

飞机起飞性能算法

郑峰敏

(航空工业西安飞机工业(集团)有限责任公司, 西安, 710089)

摘要 根据两点起飞和三点起飞不同的飞行原理和运动特点,分别建立两种不同起飞方式下的数学仿真模型。重点结合飞机的气动特性和起落架系统特性,依据全机总体设计参数进行仿真计算,给出不同起飞方式下的性能数据。以某型飞机为例,编写起飞性能程序,计算两种不同起飞方式下飞机的起飞性能。最后分析了2种不同的起飞方式对飞机各起飞阶段下的距离和速度等性能数据的影响,结合飞机实际飞行,验证仿真模型的准确性,并给出较优的起飞方式,用于指导部队飞行。

关键词 两点起飞;三点起飞;起飞性能

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2019.03.005

中图分类号 V212.1 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2019)03-0029-04

Research on Aircraft Takeoff Performance Algorithm

ZHENG Fengmin

(AVIC Xi'an Aircraft Industry (Group) Company Ltd., Xi'an, 710089, China)

Abstract: According to the different flight principle and movement characteristics of takeoff at two points and takeoff at three points, two models of mathematical simulation under condition of different takeoff modes are established respectively in this paper. Based on the aerodynamic characteristics of aircraft and the characteristics of landing gear system, the simulation results are carried out according to the whole design parameters, and the performance data of different takeoff modes are given. Taking a certain type of aircraft as an example, the takeoff performance program is programmed to calculate the takeoff performance. Finally, the effects of two different takeoff modes on the distance and velocity of each takeoff phase are analyzed, and the relevant conclusions are given based on the actual flight characteristics of the aircraft, and the accuracy of the simulation model is verified, and a fairly good take-off mode is given to guide a pilot in flight.

Key words: take off at two points; take off at three points; takeoff performance

在飞机飞行性能研究中,起飞只占一次飞行任务时间的1%~2%,却是飞行任务中十分重要的阶段,是飞机从地面滑跑状态转变为空中飞行状态的一个复杂过程^[1]。起飞性能与其起飞方式息息相关,现阶段大多数飞机的起飞方式不尽相同^[2],有两

点起飞,也有三点起飞,主要取决于飞行员的飞行习惯,以及飞机自身的状态和特征^[2]。简单来说,两点起飞时飞机较平稳,而三点起飞时,由于前轮的摆动,不如两点平稳,但比较容易操作。本文正是从2种不同的起飞方式出发,探索飞机的起飞性能是如

收稿日期: 2019-01-01

作者简介: 郑峰敏(1989—),女,陕西咸阳人,硕士,工程师,主要从事飞行器设计研究。E-mail: fengminzheng@163.com

引用格式: 郑峰敏. 飞机起飞性能算法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2019, 20(3): 29-32. ZHENG Fengmin. Research on Aircraft Takeoff Performance Algorithm[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2019, 20(3): 29-32.

何变化的,哪种起飞方式下性能更优。

1 飞机起飞过程

1.1 三点起飞

起飞是指飞机在其专用跑道上从静止状态加速离地,并在空中加速上升到安全高度的整个运动过程^[1]。飞机三点起飞可简化为3个阶段:地面三点滑跑阶段,抬前轮到离地两点滑跑阶段,离地后到安全高度阶段。三点起飞是以抬前轮速度 V_R 以及安全爬升速度 V_2 为飞行判断依据,判断飞机是否能安全起飞。所有阶段均需满足GJB 34A—2012有人驾驶飞机(固定翼)飞行性能。

1.2 两点起飞过程

两点起飞认为在整个地面滑跑过程中,三点着地只占一小部分,有很大一段都是以两个主轮着地滑跑。两点起飞是依据抬前轮速度 V_R 以及离地速度 V_{LOF} 判断飞机是否能安全起飞。飞行员是以最大适用速率 V_R 抬前轮,达到可令人满意的 V_{LOF} ,并未考虑安全高度以及安全速度等因素。

一般地,在实际试飞验证中,低速时,飞行员带杆到操纵面空气动力效率的极限位置,飞机慢慢抬前轮到一个获得最大升力系数的迎角;或对于受几何形状限制的飞机,抬前轮至迎角小于尾翘擦地角。然后,保持俯仰直至飞机离地。两种起飞方式都有地面加速段、抬前轮段、空中段。区别只在于抬前轮的时机不同,两点起飞抬前轮点要比三点起飞早很多,这就导致了两种起飞方式的仿真计算模型的差异,从而致使计算结果不同。

2 数学模型

由第1节的描述可以发现,抬前轮前后两段飞机所考虑的飞行侧重点不同,飞行姿态不同,速度、迎角、抬轮速率以及升、阻力系数也不同^[3-4]。具体计算模型^[5-6]如下:

三点滑跑阶段及抬前轮阶段模型相同:

$$\frac{G}{g}a = \frac{G}{g} \frac{dv}{dt} = P \cos(\alpha + \varphi) - F - Q \quad (1)$$

$$G = P \sin(\alpha + \varphi) + M + \rho v^2 S C_L / 2 \quad (2)$$

离地后到安全高度阶段:

$$\frac{G}{g}a = \frac{G}{g} \frac{dv}{dt} = P \cos(\alpha + \varphi) - Q - mg \sin \theta \quad (3)$$

$$\frac{G}{g}v \frac{d\theta}{dt} = P \sin(\alpha + \varphi) + \frac{1}{2} \rho v^2 S C_L - mg \sin \theta \quad (4)$$

式中: S 为机翼面积; Q 为阻力; F 为地面摩擦力; P 为发动机推力; φ 为发动机推力作用线与飞机迎角 α

之间夹角; G 为飞机质量; θ 为航迹倾斜角。本仿真模型假设跑道表面与水平面的夹角为 0 ,升降舵无偏角,假定飞机不受外界风力干扰。

3 模型求解思路

为求解不同起飞阶段的性能数据,采用定步长迭代方式,并在每一时间步长中采用变步长迭代。采用高精度常微分方程组数值算法——4阶Runge-Kutta法,用以提高计算精度,通过估计局部截断误差来改变计算步长,可以有效计算变步长迭代。定步长则是在每一时间步长数值计算结束后,通过速度或者高度来判断是否继续迭代。

3.1 三点起飞算法思路

已知失速速度 V_S ,推导计算 V_R ,关注在安全高度处的速度 V_2 ,是否满足国军标要求。由于操作方式的缘故,抬前轮段时间很短,此时 V_{LOF} 是由 V_R 和 V_2 反推计算出来的。离地速度不能单独确定,需根据飞机型号,结合试飞数据及特征速度给出。且根据国军标GJB 34A—2012,各速度需同时满足条件: $V_{zmin} \geq 1.15V_S$; $V_{LOF} \geq 1.1V_S$; $V_R \geq 1.05V_{MCA}$ 。

三点起飞仿真模型是根据国军标GJB 34A—2012,并结合用户需求设计的,且对各阶段迭代的判断环节进行了设计改进,而不需计算机反复判断和计算。其优点是终止条件非常明确,不需要程序反复进行各速度点的判断环节,故不会出现终止条件的判断误差。

3.2 两点起飞算法思路

根据低速时的试飞验证,推导出飞机的最小离地速度 V_{MU} ,进而确定 V_{LOF} 。飞行员是以最大适用速率 V_R 抬前轮,地面滑行达到适宜的 V_{LOF} ,以某一迎角自然离地爬升起飞。在该过程中,并未重点考虑安全高度处的速度。该处的速度是根据加速直线运动方程以及离地速度 V_{LOF} 、离地迎角等参数计算出来的,初始赋值: $V_{LOF} \geq 1.05V_{MU}$ 。

本文两点起飞的仿真模型,是在三点起飞模型的基础上,以其不同的飞行方式及算法为依据,编写程序语言,修改各起飞阶段迭代的判据,将迭代判据由 V_2 变成 V_{LOF} 。根据实际飞行情况,给出具体的离地速度值和迎角范围,建立两点起飞数值计算模型。结合升力与全机力矩平衡方程,编写程序,计算两点起飞。

3.3 数值计算模型

通过上述改进,建立三点起飞和两点起飞数值计算模型,分析具体机型,根据实际飞行情况,编写计算程序,具体计算模型见图1、图2。

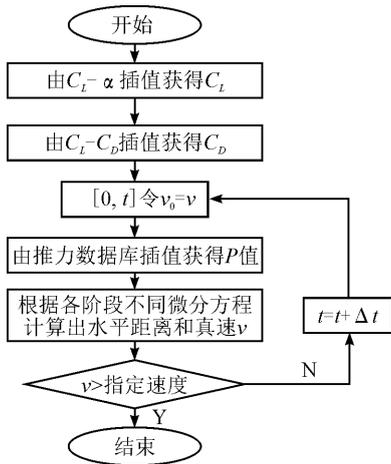


图 1 地面滑跑段计算模型

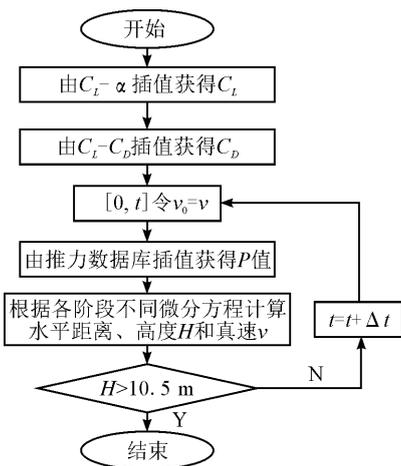


图 2 空中段计算模型

4 算例及分析

4.1 数值计算的参数和状态

本文的数学模型中,选定干水泥混凝土道面,不考虑发动机的空冷引气和防冰状态。简化起飞各阶段的迎角变化,假定 $d\alpha/dt=0$ 或者 $d\alpha/dH=0$,便于算法的计算和验证。通过 $C_L = f(\alpha, \delta_j)$ 以及 $C_D = f(C_L, M)$ 中给出的现有数据,利用二维插值法计算 C_L 和 C_D ,计算时考虑起飞状态放襟翼和起落架。通过飞机发动机的推力数据库,即 $P = f(H, M, \Delta t)$,根据飞机的压力高度 H 、马赫数 M 和温度 Δt ,通过三维插值方式获得推力数据。

程序包括该飞机的所有计算参数和状态,如起飞气动、推力原始、燃油数据库,二维、三维插值模块,数据读取模块,以及其他一些辅助模块。

4.2 算例计算

选取常用的几个起飞质量,分别计算三点和两点起飞性能数据。图 3 是飞机从 6.0~7.4 t 的 8 个质量,0 m、500 m、1 000 m 的 3 个机场高度下(图中用 am、bm、cm 表示,下同)起飞滑跑距离;图 4 是相

同条件下的起飞距离;图 5 是 2 种起飞方式下起飞滑跑距离以及起飞距离的差值对比;图 6 给出的是 2 种起飞方式下离地和起飞速度差值对比。

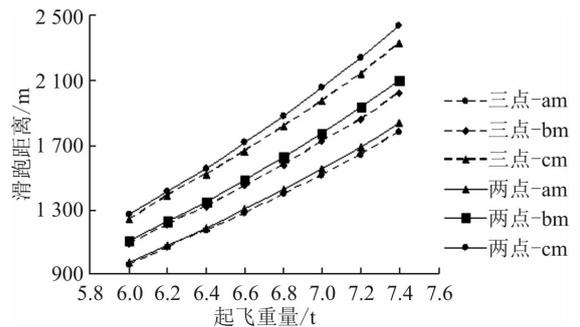


图 3 起飞滑跑距离对比曲线

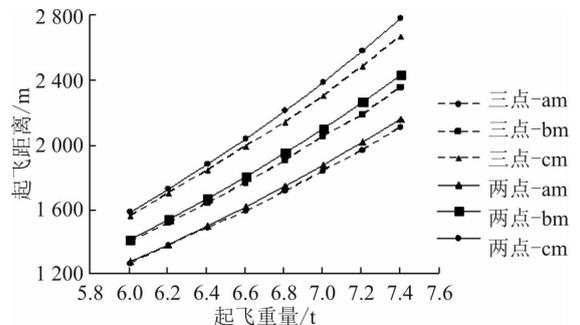


图 4 起飞距离对比曲线

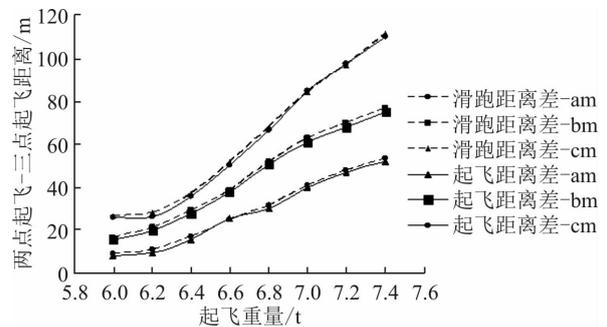


图 5 起飞滑跑距离及起飞距离差值对比曲线

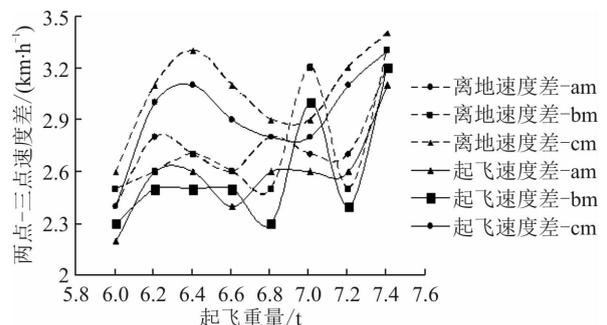


图 6 离地速度与起飞速度差值对比曲线

4.3 试飞结果对比

结合本文两点起飞的仿真模型特点,将计算结果与试飞数据对比,验证其符合性。经过某型飞机在相同状态下的试飞数据验证可以发现,两者的结果比较接近,就数据上来说,仿真结果比实际试飞数据约小 5% 左右(此处只给出定性结论)。由此可见,该仿真模型与试飞结果吻合度较好,可以作为计

算模型供部队试飞参考使用。

4.4 结果分析

1)对比两点起飞和三点起飞计算结果可知,在相同质量下,计算数据的变化趋势是相似的,数量级也一致;与部队提供的实际飞行数据对比,吻合度较好,说明计算模型是合理的,程序设计是正确的,可以用于计算飞机的起飞性能。

2)由计算模型可知,三点起飞时每次起飞前需要先确定抬前轮速度 V_R ;而两点起飞则是选择一个固定的 V_R 值,不需要每次计算。

由图6可以发现,不同质量下,飞机的离地速度差、起飞速度差变化曲线不是规律的。这是由于软件计算取值本身存在精度问题,再加上仿真模型的计算误差,所以由图中看来规律性较差。同时,因纵坐标取值较小,速度差虽然不是单调变化,但也是在很小的范围内变化的。但是当高度一定时,三点起飞的 V_{LOF} 及 V_2 均比两点起飞大,速度差均随着高度增大而增大,且变化规律是相似的。

这是由于三点起飞的各阶段必须满足 GJB 34A—2012 的要求,飞机升力足够的情况下,因速度限制,还必须压杆,且在 10.5 m 处需满足最小梯度限制,而两点起飞则是升力足够时即可离地爬升,并无其他限制条件,故而导致计算的速度结果均呈现三点起飞大于两点起飞的情况,符合计算规律。

3)对比图3和图4,不论是起飞滑跑距离或起飞距离,两点起飞均大于三点起飞。这是因为两点起飞时飞机以大迎角滑跑,必然造成阻力增大,其起飞滑跑距离和起飞距离增大。

4)对比图6可以看出,同一高度下,随着重量的增加,起飞滑跑距离和起飞距离的差值均呈现相似的变化规律,且都呈上升趋势。同一重量和高度下,两者差值数据基本相等,这说明两者的空中段飞行距离是基本相同的,差异主要体现在地面滑跑阶段。这是由于两者地面滑跑段的计算模型及程序不同造成的。此处两点起飞给出了同一个抬轮速度,故计算结果吻合度较高,但在实际飞行中,飞行员的驾驶习惯不同,给出的抬轮速度不同,则计算结果可能会有所变化。

5)经分析可知,两点起飞虽然操作简单,但是滑跑时带一定迎角,滑跑阶段速度没有严格要求,飞机属于自然离地,且 V_2 不一定满足国军标单发爬升梯度要求。而三点起飞的 V_R 是根据当次飞行质量、大气温度等数据计算或查阅手册得出;三点滑跑各阶段速度均符合国军标要求,不会出现梯度不足情况,安全性较高。

6)由2种计算结果表明,三点起飞在各飞行阶段的速度和梯度有着国军标的严格要求,飞行安全

性高,而两点起飞则相反,且在起飞滑跑距离和起飞距离上比三点起飞距离长,从规范性、安全性、最优性上考虑,建议部队采用三点起飞方式。

5 结语

一般情况下,以飞机起飞距离的长短来界定飞机的性能水平,就本文中的机型而言,建议部队使用三点起飞方式。

由于计算机型和条件的局限性,是否所有的机型都满足该计算规律,还需进一步的分析。希望通过对飞机结构和设备的不断改进,在满足操作性、稳定性和安全性的前提下,进一步完善和拓展计算模型,更全面地考虑影响起飞性能的各种因素以及飞机飞行的实际需求,研究不同机型在不同飞行条件下的最优起飞方式,优化飞机的起飞性能指标。

参考文献(References):

- [1] 杨乐. 高原机场民用飞机起飞性能关键技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2007.
YANG L. Research on the Key Technology of Civil Aircraft Takeoff Performance in High Elevation Airport [D]. Nanjing; Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007. (in Chinese)
- [2] The Documentation Service of the HUA-OU Aviation Training Center Getting to Grips with Aircraft Performance[Z]. Airbus Customer Services, 2002.
- [3] JOAO L V. Takeoff and Landing Performance Optimization: Development of a Computational Methodology [Z]. Instituto Superior Técnico, 2013.
- [4] 吴朝,王立新. 基于起飞性能的民机升阻特性推算[J]. 飞行力学,2011,29(1):1-4.
WU C, WANG L X. Estimation of Lift-Drag Characteristics of Civil Aircraft Based on Takeoff Performance [J]. Flight mechanics, 2011, 29(1):1-4. (in Chinese)
- [5] 蔡良才,王海服,朱占卿,等. 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, et al. Calculating Method of Takeoff and Taxiing Distance of Aircraft at Plateau Airport [J]. Journal of Transportation Engineering, 2013, 13(2):66-72. (in Chinese)
- [6] 王永虎,向小军. 起飞空中段性能计算改进算法[J]. 新技术新工艺,2012(3):32-34.
WANG Y H, XIANG X J. Improved Algorithm for Performance Calculation of Takeoff Aerial Segment [J]. New technology & New Process, 2012(3): 32-34. (in Chinese)

(编辑:姚树峰)