

文章编号: 1674-8190(XXXX)XX-001-09

ARJ21 飞机非标准条件下假设温度修正原则研究

王可¹, 黄玉璇¹, 夏俊²

(1. 中国民用航空飞行学院 飞行技术学院, 广汉 618307)

(2. 中国商飞上海飞机客户服务有限公司, 上海 200241)

摘要: 目前在国人民用飞机运营中已大幅使用假设温度减推力起飞, 为帮助机组理解非标准条件下快速修正原则并认可其合理性和安全性, 以 ARJ21 飞机“重量-假设温度”关系为分析对象, 分别在防冰状态、道面状态、气压状态 3 种典型非标准条件下, 开展 ARJ21 飞机假设温度变化特性分析、修正原则研究及修正结果合理性验证, 揭示非标准条件下假设温度修正原则的实质是以一个“次高温-重量”点对应的推力来匹配当前实际起飞重量, 该推力与实际起飞重量所需最小推力之差大于零, 并论证了不同机场标高对应的高温小重量区内 V_R 、 V_2 的变化规律。结果表明: 机组使用依据该方法构建的起飞分析表修正栏实施非标准条件下假设温度修正所获结果是合理和安全的。

关键词: 起飞性能; 减推力起飞; 假设温度法; 非标准条件; 修正原则

中图分类号: V271.1

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.XXXX.XX.01

Research on correction principle of assumed temperature under ARJ21 aircraft non-standard conditions

WHANG Ke¹, HUANG Yuxuan¹, XIA Jun²

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

(2. COMAC Shanghai Aircraft Customer Service Co., Ltd., Shanghai 200241, China)

Abstract: At present, the assumed temperature thrust reduction takeoff has been widely used in the operation of domestic civil aircraft. In order to assist flight crew in understanding the principle of rapid correction under non-standard conditions and to recognize its rationality and safety, the "weight-assumed temperature" relationship of ARJ21 aircraft is taken as the analysis object, and three typical non-standard conditions such as anti-ice, runway state and air pressure state are respectively investigated. Carry out the ARJ21 aircraft assumed temperature change characteristics analysis, correction principle research and correction results of the rationality verification. It is revealed that the essence of the assumed temperature correction principle under non-standard conditions is to match the actual takeoff weight with the thrust corresponding to a "sub-high-temperature weight" point, and the difference between this thrust and the minimum thrust required by the actual takeoff weight is greater than zero. And demonstrating the variation law of V_R and V_2 in the high temperature and small weight area corresponding to different airfield elevations. The results show that it is reasonable and safe to use the modified column of takeoff analysis table constructed according to this method to modify the assumed temperature under non-standard conditions.

Key words: takeoff performance; reduced thrust takeoff; assumed temperature; non-standard conditions; correction principle

收稿日期: 2024-04-03; 修回日期: 2024-09-25

基金项目: 中国民航安全能力建设资金项目(No. 2022-239); 2024 年度中央高校基本科研业务费资助项目一重点项目(24CAFUC01001)

通信作者: 王可(1976-), 男, 硕士, 副教授。E-mail: wangkecafuc@163.com

引用格式: 王可, 黄玉璇, 夏俊. ARJ21 飞机非标准条件下假设温度修正原则研究[J]. 航空工程进展, XXXX, XX(XX): 1-9.

WHANG Ke, HUANG Yuxuan, XIA Jun. Research on correction principle of assumed temperature under ARJ21 aircraft non-standard conditions[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, XXXX, XX(XX): 1-9. (in Chinese)

0 引言

假设温度起飞,是航班运行中常用的减推力起飞手段之一。实施者通过查询目标机型的“重量—假设温度”曲线(该曲线在实际运行中惯以起飞分析表离散数据的形式呈现),获得并录入飞行管理计算机一个高于实际环境温度的虚假温度,用以“欺骗”发动机使其输出推力降低至既能维持较低燃烧室温度又能确保起飞安全裕度的水平^[1],同时延长发动机使用寿命、降低维护成本、减少燃油消耗和污染物排放,有利于减少航空公司运营成本和降低机场的污染程度^[2-3]。

刘爱中等^[4-6]研究了场长、刹车能量、轮胎速度、爬升梯度和障碍物等限制因素对放行许可最大起飞重量的影响;陈红英等^[7-8]研究了民用运输飞机在标准条件下最大起飞重量和起飞速度的确定方法。国内另有诸多研究人员阐述了飞机减推力起飞实施方法及其优势^[9-15],研讨了假设温度减推力起飞实施方法及可行性^[16-17]。惠少辉等^[18]研究了常规条件下起飞分析表假设温度和起飞速度内容的合理性。然而上述研究均以国外机型为对象,基于国外制造商所提供的基础理论,围绕使用技巧展开讨论,缺少对非标准条件下修正原则构建过程的深入研究。

航空公司放行航班前,机组需两次使用起飞分析表才能达成分析目的:首先根据机场实际环境温度查表获得可容忍的航班最大起飞重量(已知温度查限重),以客观评估航班实际装载是否超出飞机能力上限;其次依据该航班实际装载查表获得实施减推力起飞的关键参数“假设温度”(已知重量查假设温度),来延长发动机使用寿命,降低航班运行成本。郝欣洁等^[19]围绕第一环节研究了ARJ21飞机在非标准条件下最大起飞重量的变化规律,确定了非标准条件下航班最大起飞重量修正值的基本逻辑。本文着重围绕第二环节,以ARJ21飞机为对象,研究该型飞机在常见非标准条件(防冰状态偏离、道面状态偏离、气压状态偏离)下实施假设温度起飞时的“重量—假设温度”特性,验证该飞机由标准条件向非标准条件修正的合理性,以期为机组提供可信好用的起飞分析表,服务国产民用飞机从“能用”向“易用”的改进目标,为安全底线上的精细化运行提供有力的理论支撑。

1 “重量—假设温度”特性

1.1 非标准条件下的“重量—假设温度”特性

假设温度减推力起飞的“重量—假设温度”特性曲线如图1所示。涡扇发动机为了保持推力恒定,当外界温度OAT升高时,涡扇转速N1和排气温EGT增加。当外界温度超过参考温度 T_{REF} 时,为防止发动机超温,控制系统会通过减少供油量保持EGT恒定,进而使输出推力减小。图1中 T_{REF} 为发动机平台推力参考温度,最大 T_{FLEX} 为对应规章规定25%减推力限制的灵活温度上限。当机组在前述第一环节确认航班实际装载未超出飞机能力上限之后,必须根据“重量—假设温度”特性曲线获得该次航班实际装载对应的假设温度才能实施起飞。

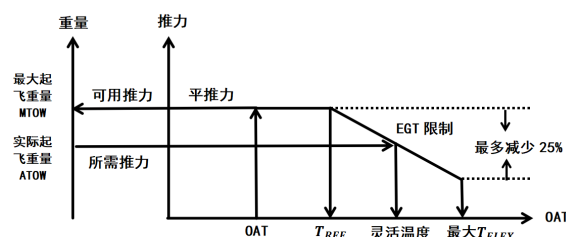


图1 假设温度法示意图

Fig. 1 Schematic diagram of assumed temperature method

一旦当次起飞面临防冰状态偏离、道面状态偏离、气压状态偏离等非标准条件变化时,如图2所示,机组必须进一步通过起飞分析表增设的附加修正内容对这些影响进行修正,才能获得与非标准条件匹配的假设温度和起飞速度。

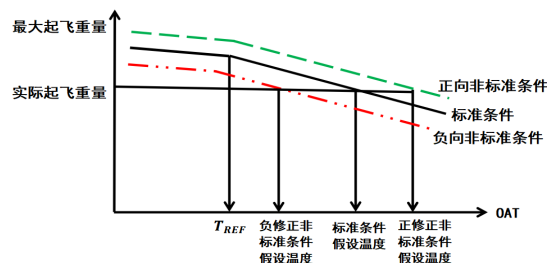


图2 假设温度受非标准条件影响示意图

Fig. 2 Schematic diagram of assuming temperature is affected by non-standard conditions

1.2 业内应用现状

空客、波音等国际主流机型在国内普及面广,

且广泛采用假设温度减推力起飞原则。空客飞机机型手册提供的非标准条件下假设温度修正流程如图 3 所示,反映了空客假设温度减推力起飞原则。国内航空公司遵循空客机型手册的指导开展运行,但空客厂家并未对该减推力起飞原则的合理性、安全性和内在规律进行深入披露。在国产民用飞机推广过程中,由于国内航空公司受国外飞机制造厂家多年(1995—2024)的习惯培养和浸染,不愿更改使用方法和习惯,国产民用飞机在推广中不得不沿袭使用修正栏为机组提供非标准条件假设温度修正的行为模式。

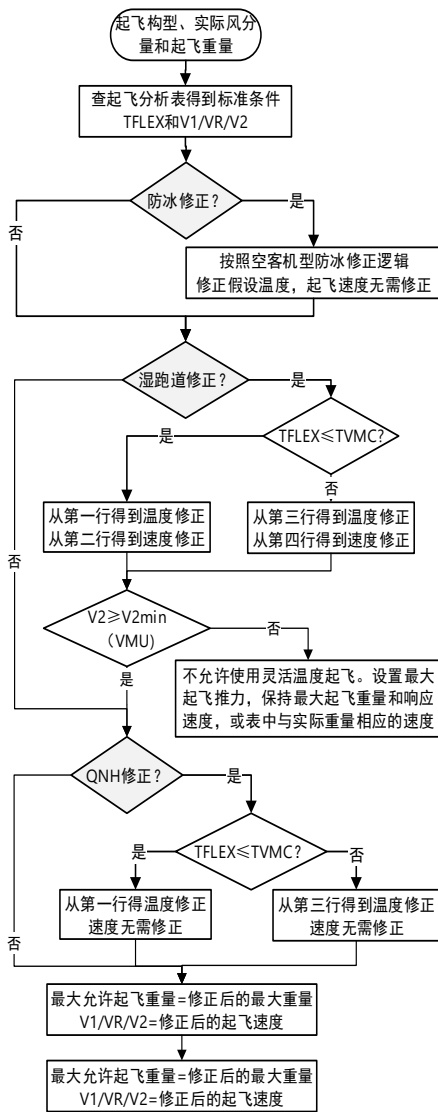


图 3 空客飞机假设温度修正流程图
Fig. 3 Airbus aircraft assumed temperature correction flowchart

因此,为了量化评估航班放行安全并建立用户对国产民用飞机的信赖,通过构建制造商认可的机型配套性能软件并对标准和非标准条件开展性能仿真从而对修正原则的合理性进行分析和论证十分必要。

2 “重量—假设温度”仿真

2.1 动力学方程描述

以飞机起飞阶段为例,飞机起飞时简化动力学质点模型如图 4 所示。

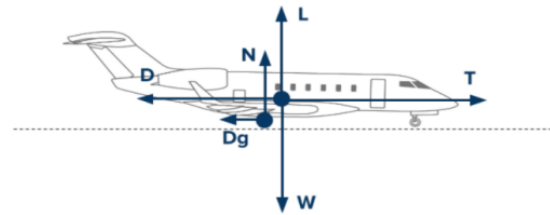


图 4 飞机起飞时的作用力
Fig. 4 Force acting on the aircraft during takeoff

除推力(T)、阻力(D)、升力(L)和重力(W)外,在飞机起飞滑跑阶段需要考虑地面支撑力(N)和地面摩擦力(D_g)。

飞机在离地前的滑跑运动可描述如下:

$$T - D - \mu(W - L) = m \cdot a \quad (1)$$

式中: T 为推力; D 为总阻力; W 为重力; L 为升力; m 为飞机重量; a 为加速度; μ 为滚动摩擦系数。

因离地瞬间升力必然与重力平衡,此时垂直方向加速度小,地面摩擦力为 0,水平速度和加速度占主导^[17],可将飞机运动模型简化为

$$T - D = m \cdot a_{lof} \quad (2)$$

式中: a_{lof} 为离地时的加速度。离地速度 V_{lof} 受最小离地速度 V_{MU} 限制^[20]:

$$V_{lof} = \text{MAX} \{ 1.1V_{MU(AEO)}, 1.05V_{MU(OEI)} \} \quad (3)$$

式中: AEO 指全发工作; OEI 指单发工作。 V_{MU} 可由推力、重力、升力系数等组成的函数式来描述,可表示为

$$V_{MU} = \sqrt{\frac{2(W - T \sin(\omega + \varphi))}{C_L \rho S}} \quad (4)$$

式中: ω 为飞机的迎角; φ 为飞机的停机角; C_L 为升力系数; S 为机翼面积; ρ 为空气密度。

离地速度 V_{lof} 可表示为

$$V_{lof}^2 = A V_{MU}^2 = A \frac{2(W - T \sin(\omega + \varphi))}{C_L \rho S} \quad (5)$$

式中: A 为常数。

因此,将式(2)展开得:

$$\eta T - \left(\frac{C_{D0}}{C_L} + K C_L \right) \cdot A \cdot \left(W - T \sin(\omega + \varphi) \right) - m a_{lof} = 0 \quad (6)$$

式中: η 为发动机推力系数; T 为发动机最大推力; C_{D0} 和 K 分别为零升阻力系数和升阻比。

$$T = \begin{cases} T_{max} \\ T_{max} \cdot (1 - \alpha Temp) \end{cases} \quad (7)$$

式中: $Temp$ 为温度; T_{max} 为发动机的最大推力; α 为常数。

当针对已确定的放行机场和放行条件时,联立式(6)和式(7)可得到温度与重量的函数关系。

起飞速度是重量的函数,根据试飞常用经验拓展公式,可将飞机的抬轮速度 V_R 和起飞安全速度 V_2 表示为

$$V_R = V_{lof} - (A_1(T/W)^2 + B_1 T/W + C_1) V_S \quad (8)$$

$$V_2 = V_{lof} + (A_2(T/W)^2 + B_2 T/W + C_2) V_S \quad (9)$$

式中: T/W 为推重比; $A_1, B_1, C_1, A_2, B_2, C_2$ 为系数; V_S 为飞机失速速度,根据飞机试飞数据所得。

2.2 性能软件仿真

PES (Performance Engineer Software) 是本文基于上述运动学方程和试飞拓展方法搭建的 ARJ21 飞机客户化性能仿真软件,如图 5 所示。



图 5 PES 软件登录界面
Fig. 5 PES login interface

截至 2022 年 11 月,该软件已保障 ARJ21 飞机 10.7 万架次。通过在 PES 中设置相关参数如风速、QNH、机场标高、跑道长度、引气状态等,计算

得到不同条件下的温度、限重等数据,即可得到离散形式的“重量-假设温度”曲线。

3 非标准条件下仿真研究

当飞机处于非标准条件时,其“重量-假设温度”曲线与标准条件下的“重量-假设温度”曲线必然不同。在标准条件起飞分析表中额外增设附加修正内容的方式来表示非标准条件下对应的各类数据是因势利导的选择,实质是在标准条件下的“重量-假设温度”曲线上按照一定的修正原则重构出非标准条件下的“重量-假设温度”曲线(即修正曲线),出于安全考虑,该曲线较非标准条件下原生的“重量-假设温度”曲线更保守。

所谓“保守”,指的是在相同的重量下,修正曲线对应的温度不高于非标准条件下实际曲线对应的温度。负向修正取温度差值集中的最大值(绿色箭头长度最大者)如图 6 所示;正向修正取温度差值集中的最小值(绿色箭头长度最小者)如图 7 所示。这样可以确保修正曲线与实际曲线之间仍然有一定的温差余量,至少不会因超过飞机实际推重能力而诱发安全风险。

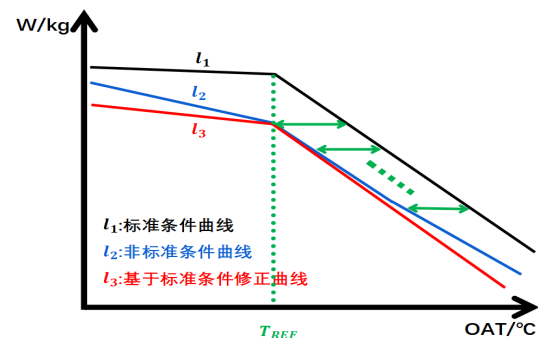


图 6 负向修正“重量-假设温度”曲线
Fig. 6 Negative correction of the “weight-assumed temperature” curve

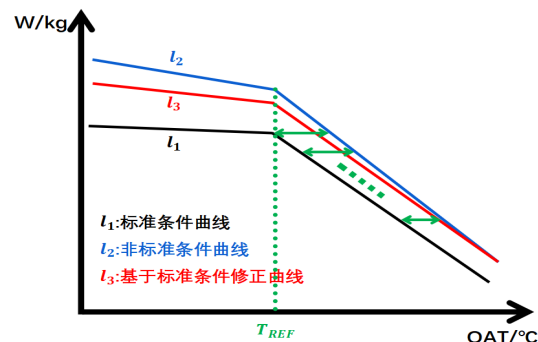


图 7 正向修正“重量-假设温度”曲线
Fig. 7 Positive correction of the “weight-assumed temperature” curve

3.1 防冰状态仿真研究

以某机场为例,在 PES 中设定详细参数 WIND 为 0 kt, QNH 为 1 013.25 hPa, 机场标高 3 500 m, 跑道长度 3 600 m, 分别仿真计算出干、湿两种运行场景下, 防冰全关、仅发动机防冰开、防冰全开所对应的“重量-假设温度”数据, 与干道面条件相比, 湿道面条件的场长能力显著下降, 整体规律为: ①防冰开启时, 受发动机特性影响, 参考温度 T_{REF} 有所降低; ②防冰开启必然造成起飞性能衰减, 相同重量下的最大假设温度比防冰关闭时更低; ③湿道面条件下, 在低于参考温度的区间, 曲线的斜率增大, 反而使得不同防冰状态曲线之间的温度跨度减小。

鉴于不同重量条件下防冰开启与未开启的温度差值的非线性变化程度高, 欲满足供机组使用的起飞分析表附加修正需求就得遵守保守原则, 在全重量范围内, 对负向修正(不利)取温度差值集的最大值。以干道面风速 0 kt 为例, 针对防冰全开条件, 将手工修正所获得的结果与仿真计算结果对比, 如图 8 所示。

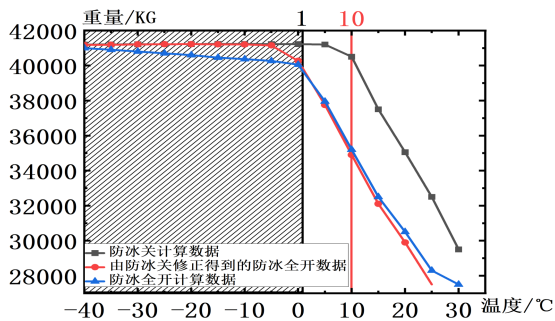


图 8 防冰全开假设温度修正图

Fig. 8 Assumed temperature correction diagram for full anti-ice operation

从图 8 可以看出: 对于给定重量, 当温度在 1~10 °C 之间时, 基于防冰关状态, 手工修正获得的防冰全开假设温度均小于仿真计算的防冰全开假设温度, 表明手工修正足够保守。值得注意的是, 尽管防冰开状态下可获得更低的参考温度, 但非标准条件下对应的参考温度必然对应更小的重量, 这就进一步拓宽了保守裕度, 故当假设温度低于该条件的参考温度(1 °C)时, 可认为已不具备实施假设温度减推力起飞条件, 参见图 8 阴影区。

3.2 道面状态仿真研究

为研究道面状态修正时的变化规律, 在 PES 中设置如下条件: WIND 为 -10 kt, QNH 为 1 013.25 hPa, 机场标高 712.6 m, 跑道长度 2 400 m, 通过仿真计算得到干、湿道面下的“重量-假设温度”数据。分析可知, 湿跑道制动摩擦系数减小造成平衡 V_1 速度减小进而导致起飞距离延长, 致使飞机性能表现削减显著。典型特征为: ①温度大于参考温度时, 二者变化特征相似; ②温度小于参考温度范围时, 重量回升造成中断起飞时更难以减速, 故需要减小 V_1 , 但受运动规则约束, 减小 V_1 必然带来更长的继续起飞距离, 进而使得湿跑道场长能力较干跑道场长能力大幅降低; ③温度进一步降低时, V_1 减小受到最小操纵速度制约, 其对继续起飞距离和场长限重的影响幅度开始减缓。

同样, 欲满足供机组使用的起飞分析表附加修正需求就得按照保守原则, 在全重量范围内, 对负向修正(不利)取温度差值集的最大值。以干道面条件为基础, 针对湿道面条件, 将手工修正后的结果与仿真计算结果对比, 如图 9 所示。手工修正后得到的湿道面曲线位于仿真计算的曲线左侧, 参见图 9 非阴影区, 说明此修正方式足够保守。

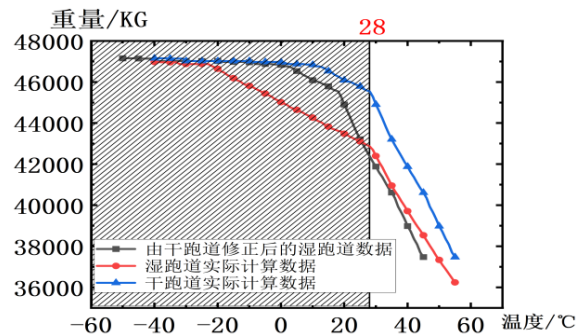


图 9 湿道面假设温度修正图

Fig. 9 Assumed temperature correction diagram of wet road surface

3.3 气压状态仿真研究

为研究气压状态(QNH 偏离)修正的变化规律, 在 PES 中设置如下条件: WIND 为 -10 kt, QNH 为 1 013.25 hPa, 机场标高 712.6 m, 跑道长度 2 400 m, 再设置 DQNH = -10、0、10 hPa 三组条件, 得到不同 QNH 下的“重量-假设温度”曲线, 如图 10 所示。

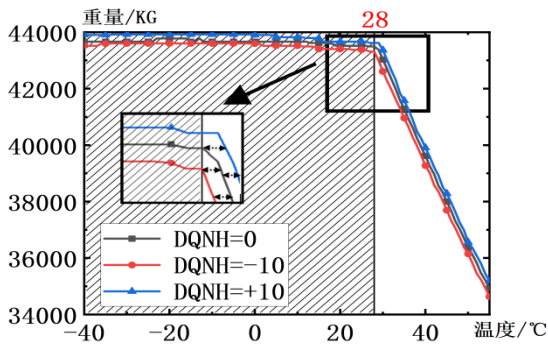


图 10 QNH 修正“重量—假设温度”规律变化
Fig. 10 QNH corrected “weight—assumed temperature” law variation

从图 10 可以看出:QNH 修正时“重量—假设温度”曲线具有“不利”和“有利”两种变化方式,典型特征为:①当 QNH 大于标准条件时,飞机对应气压高度降低,起飞性能更佳,同等重量对应的最大假设温度增大;②当 QNH 小于标准条件时,同等重量对应的最大假设温度减小;③当 DQNH 为正时,参考温度 $OAT > 28^\circ\text{C}$,当 DQNH 为负时,参考温度 $OAT < 28^\circ\text{C}$ 。当然,欲满足供机组使用的起飞分析表附加修正需求就得按照保守原则,在全重量范围内,对负向修正(不利)取温度差值集的最大值,对正向修正(有利)取温度差值集的最小值。

以 QNH 无修正及 WIND 为 0 kt 为参考标准,将 $DQNH = +10$ 和 $DQNH = -10$ 条件下手工修正后的结果与仿真计算结果对比。以 $DQNH = -10$ 条件为例,对比结果如图 11 所示,可以看出:手工修正后的数据与实际数据重合,说明此修正原则合理。

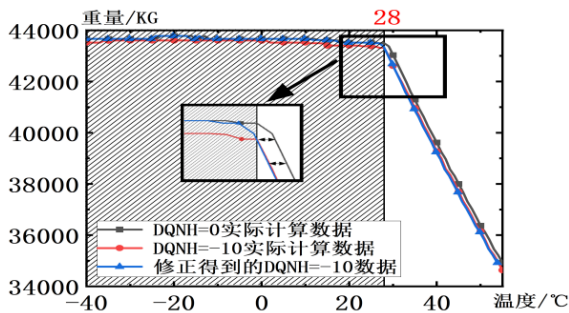


图 11 QNH 修正假设温度对比图
Fig. 11 QNH correction assumed temperature comparison diagram

3.4 速度变化仿真研究

目前,假设温度法只被许可应用于 T_{REF} 和最大 T_{FLEX} 的温度区间。在该区间内,适航审定规章用于约束 V_R 、 V_2 的空中最小操纵速度 V_{MCA} 是气压高度、温度和重量的函数。

在同一重量下,该机型 V_{MCA} 随着高度增加而减少;当机场标高小于 1 938 m(约 6 360 ft)时,在相同高度条件下, V_{MCA} 随重量的减小,先减后增;当机场标高高于 1 938 m(约 6 360 ft)时,在相同高度条件下, V_{MCA} 随重量的减小而减小。 V_{MCA} 的变化趋势如图 12 所示。

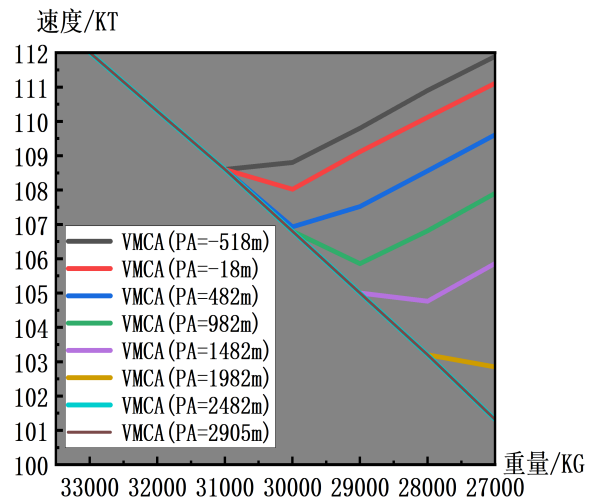


图 12 “重量— V_{MCA} ”变化趋势图
Fig. 12 “Weight— V_{MCA} ” trend diagram

无论是标准还是非标准条件下,随着温度增加,飞机的起飞性能会衰减,飞机的装载能力会下降。根据适航规章规定 $V_R \geq 1.05 \cdot V_{MCA}$, $V_2 \geq \text{MAX} \{1.1 \cdot V_{MCA}, 1.13 \cdot V_S\}$ ^[20],在小重量范围内 V_R 和 V_2 受失速速度减小的影响,会逐渐逼近 V_{MCA} 。

因此,在机场标高 1 938 m(约 6 360 ft)以下的高温小重量区, V_R 和 V_2 的变化规律需强制满足 V_{MCA} 逆增长的规律特性,如图 13 所示,这导致装载能力随温度增加而出现大幅衰减。而在机场标高 1 938 m(约 6 360 ft)以上的高温小重量区, V_R 和 V_2 不再受到 V_{MCA} 制约,如图 14 所示,重量随温度增加仍保持正常的衰减趋势。

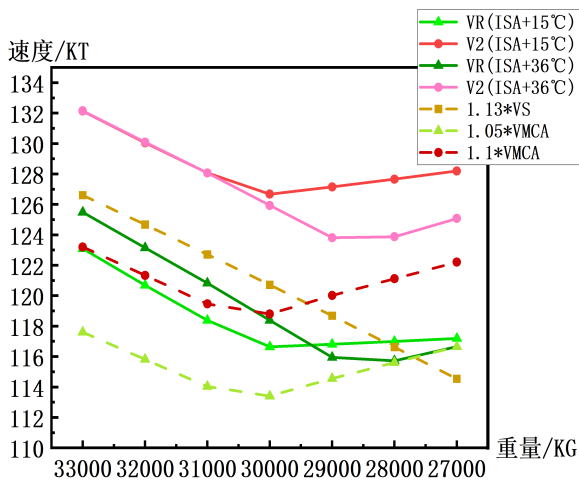


图 13 “重量—速度”趋势图(气压高度为 0 m)
Fig. 13 “Weight-velocity” trend diagram (PA=0 m)

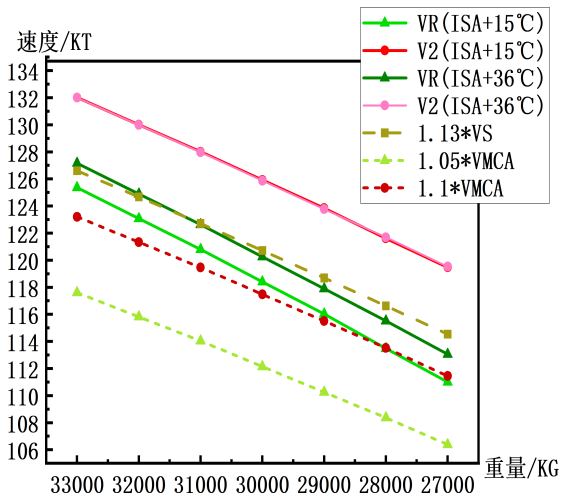


图 14 “重量—速度”趋势图(气压高度为 2 905 m)
Fig. 14 “Weight-velocity” trend diagram (PA=2 905 m)

综上,在机场标高 1 938 m(约 6 360 ft)以下的高温小重量区内, V_R 随着重量的减小逐渐逼近 $1.05 \cdot V_{MCA}$, V_2 随着重量的减小逐渐逼近 $\{1.1 \cdot V_{MCA}, 1.13 \cdot V_S\}$ 的最大值;而在机场标高 1 938 m(约 6 360 ft)以上的高温小重量区内, V_R 、 V_2 随着重量的减小而减小,且 $1.13 \cdot V_S$ 始终大于 $1.1 \cdot V_{MCA}$ 。

3.5 修正原则

供 ARJ21 机组在非标准条件下使用的假设温度方法合理可行,且结果保守可信,非标准条件下修正原则,如表 1 所示。

| 修正项 | 假设温度 | 修正值确定原则 |
|--------|------|----------------------|
| 防冰状态修正 | 假设温度 | 负修正取最大差值 |
| 道面状态修正 | 假设温度 | 负修正取最大差值 |
| 气压状态修正 | 假设温度 | 负修正取最大差值 正修正取最小差值 |

非标准条件下假设温度修正原理如图 15 所示。若飞机起飞重量为 w ,当前实际温度为 $Temp_0$,欲使用假设温度减推力起飞,就需要寻找该重量 w 对应的高温,那么 w 在曲线 l_1 上对应的温度为 $Temp_1$,在曲线 l_2 上对应的温度为 $Temp_2$, $Temp_2$ 在曲线 l_1 上对应的重量为 w' 。曲线 l_0 、 l_1 是通过 PES 仿真计算所得,能够客观反应 ARJ21 飞机的性能,而曲线 l_2 是通过修正原则得到的,比较保守。非标准条件下,对于实际重量 w ,在曲线 l_2 上对应的温度 $Temp_2$ 小于在曲线 l_1 上对应的温度 $Temp_1$,而机组通过起飞分析表快速修正得到的温度就是 $Temp_2$,将 $Temp_2$ 输入飞行管理计算机,飞机会按照 $Temp_2$ 在曲线 l_1 上对应的重量 w' 来匹配推力。在曲线 l_1 上, $Temp_2$ 对应的推力 $Thrust_2$ 大于 $Temp_1$ 对应的推力 $Thrust_1$ 。

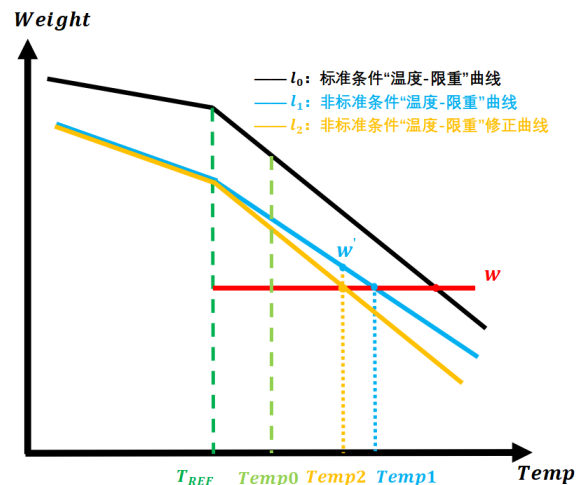


图 15 非标准条件下假设温度修正原理示意图
Fig. 15 Schematic diagram of assumed temperature correction principle for non-standard condition

4 结论

1) 非标准条件下的修正(尤其是负向修正)实

实际上是在重构之后的“重量—假设温度”曲线上找到一个“次高温—重量”点,以该点处的推力来匹配实际起飞重量。

2) 机组使用起飞分析表中修正栏查找假设温度的过程,实质是重构非标准条件下的“重量—假设温度”曲线的过程。重构曲线与原生曲线在同一重量下的推力差($Thrust_2 - Thrust_1$)大于零,说明查找结果是安全保守的。

3) 在机场标高 1 938 m(约 6 360 ft)以下的高温小重量区, V_R 随着重量的减小受到 $1.05 * V_{MCA}$ 限制, V_2 随着重量的减小受到 $MAX\{1.1 * V_{MCA}, 1.13 * V_S\}$ 限制。而在机场标高 1 938 m(约 6 360 ft)以上的高温小重量区内, V_R 、 V_2 则随着重量的减小而减小。

参考文献

- [1] TAKAHASHI T. The impact of ATTCS on reduced-thrust takeoff field performance[C]// 15th AIAA Aviation Technology Integration and Operations Conference. Dallas, Texas: AIAA, 2015: 2698.
- [2] KOUDIS G S, HU S J, MAJUMDAR A, et al. Airport emissions reductions from reduced thrust takeoff operations[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2017, 52: 15-28.
- [3] NIU Wei. The benefit and design method of reduced thrust takeoff for civil aircraft[C]// 8th International Conference on Electromechanical Control Technology and Transportation (ICECTT 2023). Hangzhou, China: SPIE, 2023: 549-555.
- [4] 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): 81-84.
LIU Aizhong, SHANG Yongfeng, LI Shilin, et al. Effect of field slope and wind velocity on field limit weights[J]. Machinery Design & Manufacture, 2015(9): 81-84. (in Chinese)
- [5] 刘爱中, 尚永锋, 李世林, 等. 障碍物对飞机起飞重量的限制规律[J]. 中国科技论文, 2015, 10(16): 1959-1962.
LIU Aizhong, SHANG Yongfeng, LI Shilin, et al. Limitation law of obstacles on aircraft takeoff weight[J]. China Science Paper, 2015, 10(16): 1959-1962. (in Chinese)
- [6] 刘爱中, 尚永锋, 李世林, 等. 民航起飞跑道限制重量的影响因素分析[J]. 机械设计与制造, 2015(7): 37-40.
LIU Aizhong, SHANG Yongfeng, LI Shilin, et al. Analysis on factors influencing field limit weights of civil aircrafts[J]. Machinery Design & Manufacture, 2015(7): 37-40. (in Chinese)
- [7] 陈红英, 刘晓明, 余江. 民航运输机最大起飞重量和起飞速度的确定[J]. 飞行力学, 2010, 28(2): 89-92.
CHEN Hongying, LIU Xiaoming, YU Jiang. Determination of maximum takeoff weight and takeoff speed for civil transport airplane[J]. Flight Dynamics, 2010, 28(2): 89-92. (in Chinese)
- [8] 王东, 陈红英, 郑孝雍, 等. 新舟 60 飞机起飞性能分析[J]. 中国民航飞行学院学报, 2011, 22(5): 36-39.
WANG Dong, CHEN Hongying, ZHENG Xiaoyong, et al. Analysis on MA60 aircraft takeoff performance[J]. Journal of Civil Aviation Flight University of China, 2011, 22(5): 36-39. (in Chinese)
- [9] 张帅浩. 民用飞机减推力起飞方法分析[J]. 科技视界, 2017(8): 109,85.
ZHANG Shuaihao. Analysis of takeoff method of civil aircraft with reduced thrust[J]. Science & Technology Vision, 2017(8): 109,85. (in Chinese)
- [10] 李书明, 商智超, 马晓政. 减推力起飞对航空发动机性能影响[J]. 机械工程与自动化, 2017(1): 166-167.
LI Shuming, SHANG Zhichao, MA Xiaozheng. Impact of reduced thrust takeoff on aero engine performance[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2017(1): 166-167. (in Chinese)
- [11] 刘双, 郭基联, 周义蛟. 运输机减推力起飞方法和收益研究[J]. 飞行力学, 2018, 36(6): 87-91, 96.
LIU Shuang, GUO Jilian, ZHOU Yijiao. Study on reduced thrust takeoff method and benefits of transport aircraft[J]. Flight Dynamics, 2018, 36(6): 87-91, 96. (in Chinese)
- [12] 钱锋. 使用减推力起飞的必要性[J]. 滨州学院学报, 2016, 32(4): 27-31.
QIAN Feng. The necessity of using the reduced thrust takeoff[J]. Journal of Binzhou University, 2016, 32(4): 27-31. (in Chinese)
- [13] 郭小玉, 刘超. 支线飞机减推力起飞技术应用研究[J]. 航空科学技术, 2017, 28(12): 65-67.
GUO Xiaoyu, LIU Chao. Application research on reduced thrust takeoff technology to the regional airplane[J]. Aeronautical Science & Technology, 2017, 28(12): 65-67. (in Chinese)
- [14] 王春蕊. 波音商用飞机减推力起飞和减少额定推力起飞应用价值简析[J]. 科技资讯, 2012, 10(26): 90, 92.
WANG Chunrui. Analysis on the application value of Boeing commercial aircraft with reduced thrust takeoff and reduced rated thrust takeoff[J]. Science & Technology Information, 2012, 10(26): 90, 92. (in Chinese)
- [15] 刘晓明, 赵廷渝, 温晓航, 等. 民航运输机减推力起飞技术

- [J]. 飞行力学, 2009, 27(3): 83-85.
- LIU Xiaoming, ZHAO Tingyu, WEN Xiaohang, et al. Reduced-thrust takeoff technique applied to passenger airplanes [J]. Flight Dynamics, 2009, 27(3): 83-85. (in Chinese)
- [16] 华振. 民用飞机假设温度减推力起飞研究与仿真[J]. 科技视界, 2016(18): 21, 23.
- HUA Zhen. Research and simulation of civil aircraft takeoff with hypothetical temperature and reduced thrust [J]. Science & Technology Vision, 2016(18): 21, 23. (in Chinese)
- [17] 王新民, 尹海韬, 郑翌, 等. 基于假设温度的大型客机减推起飞方法研究[J]. 计算机仿真, 2013, 30(8): 36-40, 45.
- WANG Xinmin, YIN Haitao, ZHENG Yi, et al. Research on reduced thrust take-off of large passenger aircraft based on assumed temperature [J]. Computer Simulation, 2013, 30(8): 36-40, 45. (in Chinese)
- [18] 惠少辉, 石佳伟. 民机减推力起飞灵活温度和特征速度的确定方法研究[J]. 科技创新与应用, 2021, 11(15): 66-68.
- XI/HUI Shaohui, SHI Jiawei. Study on the method of determining the flexible temperature and characteristic speed of civil aircraft taking off with reduced thrust [J]. Technology Innovation and Application, 2021, 11(15): 66-68. (in Chinese)
- [19] 郝欣洁, 杨俊. ARJ21 非标准条件下最大起飞重量修正方法研究[J]. 中国民航飞行学院学报, 2023, 34(1): 51-56.
- HAO Xinjie, YANG Jun. Research on correction method of ARJ21 maximum take-off weight under non-standard conditions [J]. Journal of Civil Aviation Flight University of China, 2023, 34(1): 51-56. (in Chinese)
- [20] 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, 2011.
- Civil Aviation Administration of China. Airworthiness standard of transport aircraft: CCAR-25-R4 [S]. Beijing: CAAC, 2011. (in Chinese)

(编辑:马文静)