

# 飞机顶升状态上机人数管控分析

刘立强

北京飞机维修工程有限公司 北京 100621

**摘要：**综合考虑风速、重心、总重、单个顶升点的载荷限制四方面因素对飞机顶升稳定性的影响，分别从各项因素原理角度分析，寻找量化方法，设计出一套简单、有效的计算流程，并对常规状态下的主流机型顶升状态下机上工作人数限制进行计算。

**关键词：**顶升稳定性；重心限制；数据收集；平衡计算；极限计算；流程设计

## 引言

本文以某A330飞机为例，在忽略人员小范围缓慢移动所引起的细微扰动前提下，将“机上允许工作人数”问题转化为安全顶升状态的极限求解问题。通过数据收集、重心与总重平衡计算以及极限工况分析，对顶升稳定性限制和单个顶升点载荷限制进行综合评估，提出一套简单、有效的计算流程，并给出主流机型在典型空重、无燃油、无大部件拆装状态下的机上人数限制参考值。研究成果可为维修单位制定顶升状态下人员管控标准、优化离场流程提供技术依据，对提升飞机定检期间的安全性与工作效率具有重要现实意义。

## 1 理论分析

如果忽略维护人员在飞机上小范围慢速移动带来的细微重量和重心变化，飞机在顶升状态下机上允许工作人数的计算，实际上就是飞机的安全顶升状态的计算。而飞机的安全顶升总体上有两方面的限制，一方面是千斤顶顶升飞机时的稳定性要求带来的限制，另一方面是单个顶升点机构能承受的载荷限制。（本文以某A330-200飞机为例进行分析计算，其他机型同理）。

### 1.1 稳定性限制

WBM手册的顶升状态下飞机的稳定性图如下图所示：

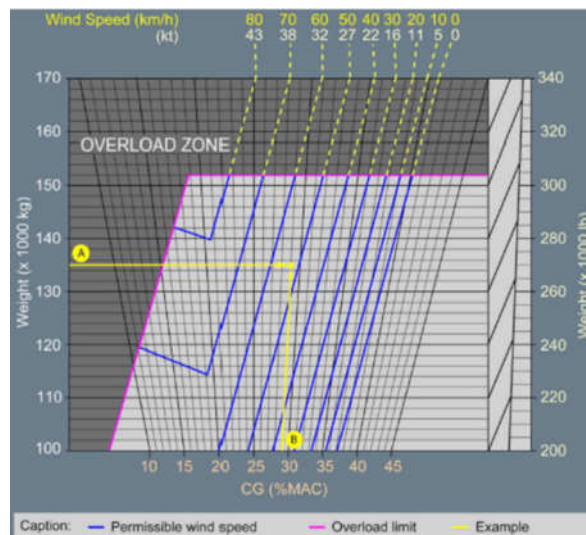


图1 顶升状态下飞机的稳定性图<sup>[1]</sup>

由此可知，千斤顶顶升飞机时的稳定性限制共有三方面内容：总重、重心、风速。飞机的总重和重心则必需在顶升前根据飞机当下构型和风速状态进行计算，符合手册的要求才能进行顶升工作。如果计算出的重量和重心交点处于图中的过载区域或者实际风速超出了该重量和重心下的风速限制，就不符合安全顶升的条件。对

于顶升状态下机上工作人数计算问题而言，只有代入假设的机上工作人数后计算出的结果符合上述限制，该人数才是可接受的人数，否则必须减少人数或增加限制条件重新计算。

#### 1.1.1 总重

飞机的重量是飞机本身和内部包含所有物体重量之

和,是飞机设计时最重要的原始数据之一,飞机的结构强度也是依据这一数值进行设计的。一旦飞机投入使用,飞机的重量就成为飞机使用的限制条件。飞机在顶升状态下的重量不能超过设计的最大顶升重量限制。

飞机的总重数据可由WBM手册的“JACK Maximum Jacking Loads”部分得知,本例中的飞机允许顶升的最大飞机重量为152000KG<sup>[1]</sup>。

而得到飞机当前重量的方法有两个(1)飞机上次称重时的重量(P称重)和当前改变的重量代数,即 $P_{\text{现在}} = P_{\text{称重}} + \sum P_j$ (2)顶升飞机前使用秤盘重新称重。方法一简单易行且工作量小,方法二准确但工作量大在飞机大修过程中不易实现

### 1.1.2 风速

由图1可以得知,风速越大,对于顶升飞机的限制也越大。一般而言,由于飞机大修时均在机库内顶升,可以将风速视为0,忽略其影响。但是即便在机库内顶升,机库大门也不一定永远处于关闭状态。此时存在两种方案:一是采用制度手段禁止飞机顶升期间开启机库大门,将风速视为0处理,二是考虑到偶尔需要开启机库大门的情况,将该时段的可能的最大风速视为风速条件参与决断。第一方案计算简单,但对于机库状况有限制。第二种方案计算复杂,并且计算得出的可上机人数要比第一种更为苛刻,但对于机库状况限制较小。具体采用哪种方案,需要根据机库使用状况、生产计划等因素综合考虑。

### 1.1.3 重心

#### (1) 重心基本知识

飞机重心是飞机重量合力的作用点,其位置对飞机的纵向稳定性和操作性有着重要的影响<sup>[3]</sup>。由于飞机结构及装载左右基本对称,飞机重心是在机体对称面内。其纵向位置常用重心沿弦向到机翼平均气动弦(MAC: Mean Aerodynamic Chord)前缘的距离和平均气动弦长之比的百分比来表示,即%MAC。%MAC与力臂(H-arm)的换算关系如下:

$$\%MAC = \frac{H - \text{arm} - \text{LEM}AC}{\left(\frac{MAC}{100}\right)} = \frac{H - \text{arm} - 31.338}{0.0727}$$

此公式在各型飞机的WBM手册中可查到,其中LEMAC(Leading Edge Mean Aerodynamic Chord)为平均气动弦前缘相对参照面的力臂<sup>[1]</sup>。

#### (2) 重心前限和重心后限的确定

如果要确保飞机重心不超出限定范围,就要确定其前限和后限。飞机的重心前后限由WBM手册的“Design Center of Gravity Limits”部分得知<sup>[1]</sup>。首先要按照飞机

的MSN号确定适用的表格,然后再根据飞机重量确定重心前限和重心后限。确定飞机的重心前限和重心后限之后,就要确保计算所得不超过其限制。

#### (3) 飞机重心计算

根据飞机的称重与平衡原理可得:

飞机重心是飞机重量合力的作用点,根据合力矩定理,在平面汇交力系中,合力对平面内任意一点的力矩,等于其所有分力对于同一点的力矩的代数和<sup>[3]</sup>。所以如果能准确判断当下飞机状态较上次称重时飞机状态的改变,就能将复杂的重心计算转换为基于称重时重心状况的改变计算,即:

飞机现在的重量等于飞机称重时的重量和改变的重量代数,即

$$P_{\text{现在}} = P_{\text{称重}} + \sum P_j$$

飞机现在的力矩等于当前重量( $P_{\text{现在}}$ )对基准轴的力矩等于飞机称重时的力矩和( $L_{\text{称重}}$ )和各变化的重量 $P_j$ 对同一轴力矩( $P_j \times L_j$ )的代数和的代数和,即

$$L_{\text{现在}} = L_{\text{称重}} + \sum P_j \times L_j$$

由此可得现在的飞机重心到基准面的距离,即力臂

$$H - \text{arm} = \frac{L_{\text{现在}}}{P_{\text{现在}}}$$

再利用%MAC与力臂(H-arm)的换算关系式可得%MAC形式的重心位置。

此处用到的重心计算有两个基础:一是可以获得上次称重报告的数据,二是能够准确判断当下飞机状况较上次称重时的变化且变化不大。如果当下飞机状况较上次称重时的变化很大,计算工作就会变得复杂,计算准确性也会下降,此时推荐先称重确定飞机当下重心状况。

#### (4) $P_j$ 与 $L_j$ 的确定

一般情况下,将要顶升飞机的状况较上次称重时的变化主要体现在大型部件拆装、燃油量、饮用水和污水量这几方面。

大型部件拆装方面,称重时的飞机构型一般是比较完整的,飞机顶升时的构型改变一般为部件拆除,拆除部件的 $P_j$ 和 $L_j$ 可从WBM手册的“EQP List of Removable Equipment”部分查得<sup>[1]</sup>。

燃油方面,如果顶升飞机时油箱内有大量燃油则需要进行燃油分布调整并确定燃油对应的 $P_j$ 与 $L_j$ 。每个油箱的重心会随着油箱内燃油量的变化而变化,读取到飞机机载燃油质量( $P_{\text{燃油}}$ )后,将燃油质量转换为体积,然后再利用WBM手册的“Fuel Quantities and H-Arms”部分对出相应H-ARM(即 $L_{\text{燃油}}$ )<sup>[1]</sup>。

饮用水与污水方面,飞机称重时要求饮用水箱和污

水箱处于排空状态，如果顶升飞机时排空饮用水箱和污水箱未排空，则需要考虑饮用水与污水对飞机重心的影响。具体计算方法为：首先从客舱前乘务员面板读取饮用水箱和污水箱占用百分比，然后从WBM手册的“POTABLE WATER TANK”部分和“WASTE TANK”部分分别读取各个箱的容积（ $V_{\text{饮用水箱}}$ 、 $V_{\text{污水箱}}$ ）、折算密度（ $\rho_{\text{饮用水箱}}$ 、 $\rho_{\text{污水箱}}$ ）、力臂数据（ $L_{\text{饮用水箱}}$ 、 $L_{\text{污水箱}}$ ）。若设饮用水重量为 $P_{\text{饮用水箱}}$ ，饮用水相对基准面的力矩为 $M_{\text{饮用水箱}}$ ，则 $P_{\text{饮用水箱}} = V_{\text{饮用水箱}} \times \rho_{\text{饮用水箱}}$ ， $M_{\text{饮用水箱}} = P_{\text{饮用水箱}} \times L_{\text{饮用水箱}}$ 。由此可算出饮用水相对基准面的力矩，污水同理。

(5) 顶升状态下机上工作人员对飞机的重心影响

由于机上工作人员在飞机上的站位是不确定的，所以此处的计算利用极限平衡状态的思想<sup>[3]</sup>。站位在飞机重心前方的工作人员的力臂均取所有可能的工作站位力臂的最大值，即驾驶舱站位。站位在飞机重心后方的工作人员的力臂同理均取后厨房后端站位。单个人员的重量按成人标准重量80kg计算。如此，顶升状态下机上工作人员对飞机的重心影响就实现了量化计算。

1.2 单个顶升点的载荷限制

表1 各机型上机人数限制表

型号	737NG	744	748	748F	777-300ER	321	330-200	330-300	350
前舱	6人	32人	24人	38人	31人	5人	31人	23人	31人
后舱	11人	38人	68人	40人	65人	12人	28人	28人	48人

注意：此人数限制只适用于构型完整的空重状态飞机，若不符合则应另行评估。

3 流程设计

(1) 顶升前:单机项目经理将飞机当前状态和需要的飞机顶升状态报给生产工程师，工程师根据飞机当前状态进行计算，确保顶升前飞机总重和重心在手册要求的限制，并给出可上机人数限制和注意事项。

(2) 顶升和放下过程中：安排专人查看铅锤或机载计算机指示情况，以监视飞机顶升和放下过程中的飞机姿态，通过控制各顶点上升或下降速度来保证飞机平稳。顶升和放下飞机前移除飞机周围工具 设备，梯架等，避免由于飞机高度变化导致剐蹭的危险。

(3) 顶升到位后：根据具体情况使用稳顶（或保险托架），单机项目经理根据工程师给出人数限制和注意事项合理安排上机工作人员。如果需要在飞机顶升的状态下拆装发动机，起落架，升降舵，方向舵，安定面等对飞机平衡影响较大的部件，则要提前找生产工程师重新评估，确认拆装后飞状态满足平衡要求后再进行相关

工作。

单个顶点的载荷限制在两个方面：一是顶升设备的载荷极限限制，二是飞机制造厂商出于飞机结构强度考虑进行的限制。

关于飞机结构强度考虑进行的限制，AMM手册和WBM手册的“JACK Maximum Jacking Loads”部分都给出了限制<sup>[1][2]</sup>。波音飞机采用后三点式顶升方案，顶升点载荷限制对机翼顶升点和后顶升点进行限制。空客飞机采用前三点式顶升方案，前顶升点和机翼顶升点为主顶升点，机尾处为辅助顶升点。一般情况下辅助顶点由于设计机构强度偏弱其承受载荷也有更严格的限制，本例中的A330-200飞机辅助顶升点最大承载重量为4587kg（A320系列飞机辅助顶升点的最大承载重量为2000kg，A350系列飞机辅助顶升点的最大承载重量为7800kg）<sup>[1][2]</sup>。

2 典型状况下的计算结果

综合考虑飞机稳定限制和各顶点的载荷限制，为保障生产安全将所有极限值预留出 50%的安全余量，若飞机处于部件无拆除、油箱无燃油、饮用水和污水箱全空的典型状况下，且不考虑风速影响，分别对目前主要维修机型进行计算，可得如下结果：

结束语：空客飞机禁止使用尾顶顶升飞机，初始安装时尾顶只是接触顶点即可。在飞机姿态产生变化，飞机抖动等维护工作前必须撤出尾撑，如起落架收放，使用千斤顶调整飞机姿态等。空客飞机尾撑点承受载荷在AMM手册中有严格限制。建议尾顶安装报警装置，报警阈值设定值不得大于限制值的 50%，即 A320: 1000KG A330: 2250KG A350: 3900 KG

参考文献

[1]Airbus, A330 Weight and Balance Manual [M],Airbus Company,2021.6.11.  
 [2]Airbus, A330 Aircraft Maintenance Manual Rev.80 [M],Airbus Company, 2022.1.1.  
 [3]李幼兰,等.空气动力学和维护技术基础:ME、AV[M].北京:清华大学出版社,2017