农林飞机近地作业飞行的纵向稳定特性

乐 挺 王立新 况 龙

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院，北京 100191) (洪都航空工业集团，南昌 330024)

摘 要：分析了农林飞机近地作业飞行的纵向气动力特性，讨论了存在地面效应时的纵向静稳定性准则及主要气动导数对静稳定性的影响；根据地效区内飞机的五阶小扰动运动线化方程，计算了农林飞机近地作业飞行的模态特性，并运用特征矢量研究了各模态中起主要作用的运动变量；利用 Routh 判据对农林飞机近地作业飞行的纵向动稳定性进行了分析，通过简化推导了存在地面效应时保证飞机动稳定性其重心的位置要求. 研究结果表明，农林飞机近地作业飞行时地面效应对其纵向气动特性及稳定性的影响不可忽略.

关 键 词：农林飞机；近地飞行；地面效应；纵向稳定性

中图分类号：V 211

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2008)06-0634-04

Longitudinal stability of an agriculture aircraft during low-altitude flight operation

Yue Ting Wang Lixin

(School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Kuang Long

(Hongdu Aviation Industry Group, Nanchang 330024, China)

Abstract: The longitudinal aerodynamics of agriculture aircraft during low-altitude flight operation was analyzed. And the longitudinal static stability criterion in ground effect was discussed, including the effects of major aerodynamic derivatives on longitudinal static stability. By the five-order small-disturbance linear equation in ground effect, the influence on the mode properties of agriculture aircraft during low-altitude flight operation was computed. And the approach of mode vectors was used to investigate the dynamic stability, which is useful to understand the major variables acting in different modes. The longitudinal dynamic stability was analyzed by Routh's criteria. To ensure dynamic stability, the favorable position of the center of gravity was deduced by approximations. The results show that the longitudinal aerodynamics and stability influenced by ground effect should not be ignored for the agriculture aircraft during low-altitude flight operation.

Key words: agriculture aircraft; low-altitude flight; ground effect; longitudinal stability

农林飞机在空中施肥、喷撒农药等飞行作业时，为了提高作业效率，飞行高度往往较低，一般只有几米. 当飞机的飞行高度小于翼展时，其气动力特性就会因地面效应的作用而发生改变.

研究表明[1-2]，二维机翼的地面效应仅取决于飞行高度与弦长的比值. 对于全机而言，其地面效应和飞行高度及机翼的几何尺度均有关系.

对于常规气动布局的农林飞机，地面效应一般能提高飞机的气动效率，但往往也给其纵向稳定性带来一些不利的影响. 如果在农林飞机的设计过程中忽略了地面效应对其气动特性的影响，就有可能导致其近地飞行时的纵向稳定性下降，

收稿日期：2007-05-22

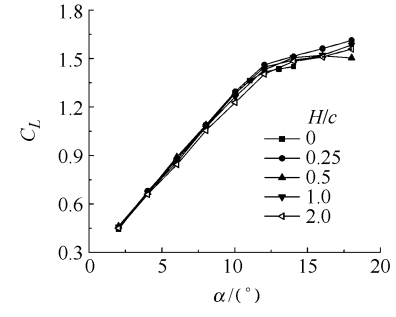
作者简介：乐 挺(1982—)，男，湖北通山人，博士生，yueting_buaa@sina.com.

会影响到其作业的飞行品质.由于农林飞机作业飞行时的高度储存不够,若纵向稳定性恶化,亦会影响其作业飞行的安全性.

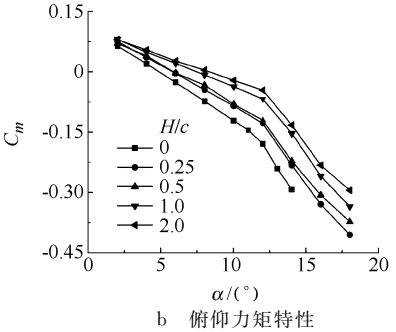
本文主要分析某型农林飞机近地作业飞行时地面效应对其气动特性和稳定特性的影响,研究结果对于农林飞机的气动布局优化设计及作业飞行的安全性评估等均具有实用参考价值.

1　近地飞行的气动力特性

农林飞机近地作业飞行时,地面效应将影响飞机的空气流动特性,从而改变作用在飞机上的气动力.通过风洞试验,测得某型农林飞机在不同高度下近地作业飞行时(重心距平均气动弦长 c 前缘的相对距离 $\overline{X}_{CG}=0.234$,拉力系数 $C_T=0.287$,襟翼偏角 $\delta_F=0°$)的纵向气动特性如图 1.



a　升力特性



b　俯仰力矩特性

图 1　某型农林飞机近地飞行时的纵向气动特性

从气动力曲线可以看出,存在地面效应时,迎角 α 相同时,飞机的升力系数 C_L 在很大范围内随着高度 H 的降低逐渐增大,但增幅较小,而在 H 接近于零的极端情况,C_L 反而有所下降;飞机的低头俯仰力矩系数则随着 H 的降低明显增加.由此可见,飞机在近地作业飞行时由于地效的存在,C_L 和俯仰力矩系数 C_m 对 H 的导数 C_{LH},C_{mH} 不能忽略,但由于阻力变化不明显,一般阻力系数 C_D 对 H 的导数 C_{DH} 可以不予考虑.

根据地效区内 C_L 随 H 变化的特性,可将整个地效区域分为极端地效区和正常地效区.极端地效区是指飞行高度在约 $10\%c$ 以内的区域,此时 C_L 随着 H 降低有所减小,但飞机通常不会在此区域飞行;极端地效区以外的地效区域即为正常地效区.

可见,在地效区内农林飞机 C_L 随着 H 的变化呈非线性.正常地效区内,C_L 随 H 降低而增大,这主要是由于机翼下翼面气流受到阻滞,导致正压力增强;同时,地效削弱了飞机的翼尖涡流,增大其有效展长,也使得飞机的升力增加.当 H 极低时,机翼翼面边界层与地面边界层融合,使得机翼上翼面正压力梯度增大,由于空气粘性的影响导致了气流的分离,升力效应下降.

农林飞机在正常地效区内近地飞行时,随着 H 的降低,一方面由于机翼升力增加且气动力作用点后移,产生低头力矩;另一方面由于机翼的下洗减小及地效区内平尾升力的增加,导致低头力矩进一步增大.当 H 极低时,尽管全机升力由于机翼后缘上表面气流分离而有所下降且气动中心稍稍前移,但由于平尾的安装位置比机翼高,此时平尾的升力仍然增大,且起主导作用,导致了全机低头力矩的增大.

2　静稳定性

2.1　俯仰静稳定性

农林飞机近地作业飞行时,地面效应改变了飞机的气动特性,也会影响到其纵向稳定特性.

从表 1 可以看出,受地面效应影响时,随着 H 的降低,农林飞机的迎角静稳定性 $C_{m\alpha}$ 和 dC_m/dC_L 的绝对值都逐渐增大,即焦点的位置 $\overline{X}_{F\alpha}$ 随着 H 的降低逐渐后移,俯仰静稳定性增加,存在地效时迎角焦点位置向后相对移动最大可达 29.78%.如前文所述,其主要原因是存在地效时,随着 H 的降低机翼气动中心后移(H 极低时前移但移动量很小),同时平尾气动效率的提高,最终导致其纵向稳定性增强.

表 1　某型农林飞机近地作业飞行的俯仰稳定性

H/c	$C_{m\alpha}$	dC_m/dC_L	$\overline{X}_{F\alpha}$
0	−1.4251	−0.2384	0.4724
0.25	−1.1620	−0.1856	0.4196
0.5	−1.0623	−0.1698	0.4038
1.0	−0.9477	−0.1551	0.3891
2.0	−0.8263	−0.1407	0.3747
500(巡航)	−0.7077	−0.1300	0.3640

2.2　高度静稳定性

高度静稳定性的定义:当飞机定直平飞时,飞行高度受到扰动后其具有恢复原飞行高度的趋势,则飞机具有高度静稳定性,即升力对高度的导数 $dL/dH<0$[3].

在地效区内，飞机的气动力不仅与 α 有关，还与 H 有关，C_L 和 C_m 的无量纲增量为

$$\left.\begin{aligned}\Delta C_L &= C_{L\alpha}\Delta\alpha + C_{LH}\Delta\overline{H}\\ \Delta C_m &= C_{m\alpha}\Delta\alpha + C_{mH}\Delta\overline{H}\end{aligned}\right\} \tag{1}$$

消去 $\Delta\alpha$，由 $\mathrm{d}L/\mathrm{d}H<0$ 得到高度静稳定性条件：

$$C_{m\alpha}C_{LH} - C_{L\alpha}C_{mH} > 0 \tag{2}$$

令 $\overline{X}_{CG}-\overline{X}_{FH}=\dfrac{C_{mH}}{C_{LH}}$，$\overline{X}_{FH}$ 为高度焦点距 c 前缘的相对距离.

1) 极端地效区内的高度静稳定性

在此区域内 $C_{LH}>0$，$C_{mH}>0$，$C_{m\alpha}C_{LH}-C_{L\alpha}C_{mH}<0$ 始终成立，说明飞机在极端地效区内高度静不稳定.

2)正常地效区的高度静稳定性

对于常规气动布局飞机，$C_{m\alpha}<0$，$C_{L\alpha}>0$，正常地效区内 $C_{LH}<0$，$C_{mH}>0$. 那么高度静稳定性条件可以变为：$\overline{X}_{FH}-\overline{X}_{F\alpha}<0$，即高度焦点位于迎角焦点前面才能保证高度静稳定性[4-5].

此时，式(2)中 $C_{m\alpha}C_{LH}>0$，有利于静稳定性；$C_{L\alpha}C_{mH}>0$ 不利于静稳定性. 因此，$|C_{LH}|$ 和 $|C_{m\alpha}|$ 越大越有利于高度静稳定性；$C_{L\alpha}$ 越小越有利于高度静稳定性；而 C_{mH} 越小甚至为负值，越有利于高度静稳定性[6].

从表2的高度静稳定性计算结果可以看出，农林飞机在正常地效区高度是静不稳定的. 其主要原因是 $|C_{LH}|$ 不够大，C_{mH} 又不够小. 对于这种常规气动布局的飞机，在地效区内 H 降低时升力增加不大，低头力矩却大大增加，即 $|C_{LH}|$ 较小，C_{mH} 较大，导致高度焦点通常位于迎角焦点之后，使得高度静不稳定，且随着 H 的下降，高度静不稳定度增大. 可以看出，其高度静稳定度 $|C_{m\alpha}C_{LH}-C_{L\alpha}C_{mH}|$ 很小，处于弱静不稳定，而由于实验误差等因素可以认为此时飞机为高度中立静稳定.

表2 某型农林飞机近地作业飞行高度静稳定性

H/c	$\overline{X}_{F\alpha}$	$\overline{X}_{FH}$	$C_{m\alpha}C_{LH}-C_{L\alpha}C_{mH}$
0.25	0.4201	0.5863	−0.0474
0.5	0.4038	0.6135	−0.0397
1.0	0.3891	0.6776	−0.0235
2.0	0.3747	0.8494	−0.0072
3.0	0.3667	1.0340	−0.0019

3 动稳定性

3.1 动稳定性判定

地效区内农林飞机的运动方程与无地效时形式一样，只是增加了高度导数，运动方程如下：

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\begin{bmatrix}\Delta V\\ \Delta\alpha\\ q\\ \Delta\theta\\ \Delta H\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}X_V & X_\alpha+g & 0 & -g & X_H\\ Z_V & Z_\alpha & 1 & 0 & Z_H\\ M_V+M_{\dot\alpha}Z_V & M_\alpha+M_{\dot\alpha}Z_\alpha & M_q+M_{\dot\alpha} & 0 & M_H+M_{\dot\alpha}Z_H\\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0\\ 0 & -V & 0 & V & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta V\\ \Delta\alpha\\ q\\ \Delta\theta\\ \Delta H\end{bmatrix} \tag{3}$$

其中，q，θ 分别为俯仰角速度和俯仰角；g 为重力加速度；Z 轴合力分量对 H 的导数 $Z_H=-\dfrac{1}{2}\cdot\rho V^2SC_{LH}/mV$，$m$ 为飞机质量，ρ 为空气密度，S 为机翼参考面积；俯仰力矩对 H 的导数 $M_H=\dfrac{1}{2}\cdot\rho V^2ScC_{mH}/I_y$；$I_y$ 为飞机绕 y 轴的转动惯量，矩阵中的其它纵向动力学导数见参考文献[7].

式(3)的状态矩阵特征方程为 $As^5+Bs^4+Cs^3+Ds^2+Es+F=0$，$A$，$B$，$C$，$D$，$E$，$F$ 为特征方程各次项系数. 根据 Routh 判据，要使特征值均为负实部，须满足以下条件：

$$\left.\begin{aligned}&B>0\\ &C>0\\ &D>0\\ &E>0\\ &F>0\\ &R=D(BC-D)(BE-F)-\\ &\quad B(BE-F)^2-F(BC-D)^2>0\end{aligned}\right\} \tag{4}$$

$B>0$，即 $-M_{\dot\alpha}-Z_\alpha-X_V-M_q>0$，显然成立.

由 $C>0$ 和 $D>0$ 得

$$\left.\begin{aligned}Z_H &> \frac{1}{V}[X_V(M_{\dot\alpha}+M_q+Z_\alpha)+\\ &\quad Z_V(g-X_\alpha)+(M_\alpha+Z_\alpha M_q)]\\ Z_H &> \{Z_V[(X_\alpha+g)M_q+gM_{\dot\alpha}]+\\ &\quad X_V(M_\alpha-Z_\alpha M_q)-M_VX_\alpha\}/\\ &\quad [V(M_{\dot\alpha}+X_V+M_q)]\end{aligned}\right\} \tag{5}$$

不等式组(5)说明 Z_H 越大越有利于稳定性，即要求 $|C_{LH}|$ 越大越好.

由 $E>0$ 可得 $\dfrac{M_H}{Z_H}-\dfrac{M_\alpha}{Z_\alpha}<\dfrac{-X_V}{Z_\alpha}(M_q+M_{\dot\alpha})$，当高度焦点位于迎角焦点前时，其恒成立. 由 $F>0$ 可得 $\dfrac{M_H}{Z_H}<\dfrac{M_\alpha X_V-M_VX_\alpha}{X_\alpha Z_V-Z_\alpha X_V}$，同样对高度焦点的位置有所限制，当忽略速度导数时，即为高度静稳定性准则.

由不等式组(4)可以计算出农林飞机近地飞行保证动稳定时 C_{LH} 和 C_{mH} 的数值范围，如图2

中的阴影部分所示.此飞机的 C_{LH} 数值很小,不在稳定区域内,表明在此飞行状态下飞机是动不稳定的.

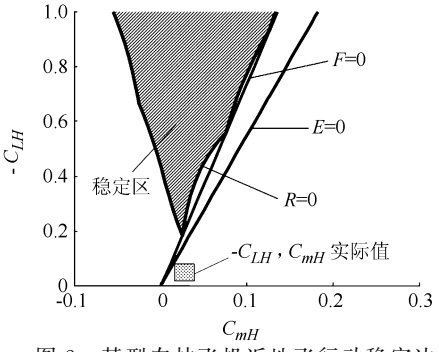


图 2　某型农林飞机近地飞行动稳定边界

需要说明的是,一架飞机的操稳特性主要取决于其短周期运动模态的特性,即使有一个小的不稳定模态,对飞机的实际飞行特性不会产生实质性的影响.

3.2　模态特征分析

农林飞机在正常地效区内飞行时的模态特性如表 3.当 H/c 逐渐降低时,飞机长周期的一对共轭复根逐渐向实轴靠拢,当 H/c 由 2.5 下降到 2.0时,共轭复根蜕变成了两个实根.即在 2.0 到 2.5之间必然存在一个临界高度,当 H/c 小于这个临界高度时,特征根的形式由两对共轭复根和 1 个实根(对应高度弱模态)变为一对共轭复根和 3 个实根.另外,通过计算与特征根对应的特征矢量,可以分析各个模态下运动变量的相对大小和相位角.

表 3　某型农林飞机近地作业飞行模态特征根

H/c	短周期模态	非/长周期模态	高度模态
0.25	−2.570 4±3.191 7i	0.491 5	0.002 4	−0.815 3
0.5	−2.593 0±2.999 5i	0.493 1	−0.043 8	−0.729 1
1.0	−2.618 2±2.762 6i	0.389 4	−0.034 9	−0.541 0
2.0	−2.626 6±2.511 8i	0.181 7	−0.076 5	−0.193 2
2.5	−2.616 1±2.415 2i	−0.071 6±0.109 3i	0.079 2
3.0	−2.605 0±2.351 4i	−0.038 0±0.168 8i	0.023 6

从矢量图(图 3)可以看出,在短周期模态中,H,q 和 α 都有比较明显的变化,在其他 3 个非周期模态中,只有 H 和 V 有明显反应.即 H 在各种模态中反应都很强烈,当非周期模态不稳定时,采用 H 和 V 的反馈控制将较为有效.

3.3　动稳定性简化分析

由模态矢量分析知,地效区内飞机的短周期运动中速度变化不明显,因而可以忽略速度变化分析短周期的动稳定性,简化后得到四阶特征方程为

$$as^4+bs^3+cs^2+ds+e=0 \qquad (6)$$

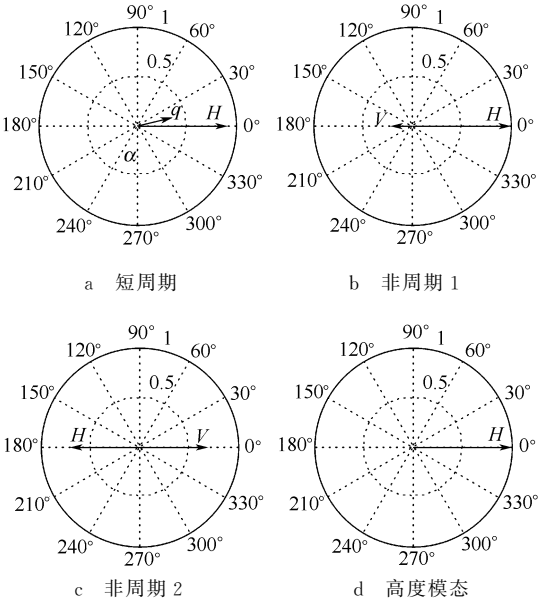


图 3　特征矢量图($H/c=1.0$, $C_T=0.287$, $\delta_F=0°$)

式中,a,b,c,d,e 为特征方程各次项系数.在保证 b,c,d,e>0 时,通过 r=bcd−b²e−d²>0 则可判断特征方程(6)的复根稳定性,即振荡稳定性.

由 e>0,可得 $Z_\alpha M_H V-M_\alpha Z_H V>0$,从而得到高度静稳定性条件 $C_{m\alpha}C_{LH}-C_{L\alpha}C_{mH}>0$,说明高度静稳定性是动稳定性的必要条件.

由 r>0 得

$$\overline{X}_{CG}>\overline{X}_{FH}+\Delta\overline{X} \qquad (7)$$

其中

$$\Delta\overline{X}=\frac{Z_\alpha}{M_{\dot\alpha}+M_q}(\overline{X}_{F\alpha}-\overline{X}_{FH})+\frac{I_y}{cm}\left(\frac{-M_q}{V}+\frac{Z_H}{-Z_\alpha-M_{\dot\alpha}-M_q}\right)$$

保证 $\overline{X}_{F\alpha}-\overline{X}_{FH}>0$ 即满足高度静稳定的情况下,$\Delta\overline{X}>0$ 始终成立,由式(7)可得飞机的重心必须位于迎角焦点和高度焦点之间才能保证其振荡稳定性,如图 4 所示.

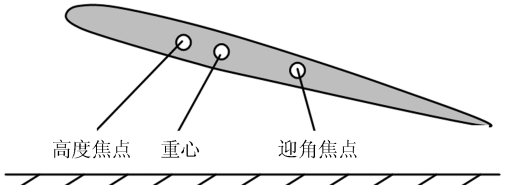


图 4　地效区内保证动稳定性时重心的位置

4　结　论

1) 农林飞机近地飞行时,升力系数随着高度呈非线性变化.受地效影响时机翼气动作用点后移且平尾升力增大,使低头俯仰力矩明显增加.

(下转第 642 页)