

# 地效对飞机气动特性的影响研究

## The Study of the Ground Effects on the Aircraft Aerodynamic Characteristics

王继明 / Wang Jiming

(上海飞机设计研究院, 上海 201210)

(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

### 摘要:

当飞机起飞或着陆时由于近地会产生地面效应。地效使得飞机的气动特性发生较大变化,如升力增大、阻力减小及静安定度的提高等。通过试验数据分析了地效状态下纵、横航向气动特性及舵效的变化,并对其内在影响机理进行了初步分析。结果显示,地效使得着陆构型失速提前约 $2^\circ$ 、纵向静安定度增加约 $0.15b_A$ 、横向安定性增加约 $10\% \sim 20\%$ 、平尾效率减小可达 $10\%$ 、方向舵效率变化较小但副翼效率减小可达 $10\%$ 。由此使得飞机的失速特性、横航向稳定性及操纵性变差。

**关键词:**地效;静安定度;机理;舵效

**中图分类号:**V212

**文献标识码:**A

[Abstract] As an aircraft takeoff or landing, the aerodynamic characteristics change a lot for the ground effect, such as lift/stability increasing and drag reducing etc. This paper analyzes the change of the longitudinal/lateral characteristics and maneuvering surface efficiency, and also tries to analyze the mechanism of the ground effect. Results show that, with ground effect, the stall happens  $2^\circ$  earlier, longitudinal stability increases  $0.15 b_A$ , lateral stability increases  $10\% \sim 20\%$ , horizontal tail efficiency increases  $10\%$ , rudder efficiency changes little while the decrease of the aileron efficiency can reach  $10\%$ . Due to these effects, stability and maneuvering ability of the aircraft are deteriorated.

[Key words] ground effect; stability; mechanism; maneuvering surface efficiency

## 0 引言

地效是指飞行器近固定面(如地面、水面)产生增升减阻的现象。关于该现象的机理,目前普遍的观点认为由于翼梢涡及机翼的下洗流受到固定面的抑制从而增加升力及减小诱导阻力。飞机在起飞和着陆时都有一段接近地面的过程,一般距地面半个展长时,地效开始起作用,随着距离的接近地效会变强。关于地效试验研究,也有采用活动地板模拟<sup>[1]</sup>,活动地板优点是更接近于实际飞行情况但缺点是机构更复杂,限于目前国内试验技术及设备,本文采用的是固定地板研究。目前关于近地时气动特性机理变化的研究文献较少。近地时较明显的变化就是升力的增加及阻力的减小, Juhee Leep<sup>[2]</sup>等认为升力的增加主要是下表面压力的增加

而上表面不变引起,近地时翼梢涡得到抑制从而减小了阻力。

本文将某翼吊常规布局民机为研究对象,从带地效后对其纵向、横航向气动特性及各操纵面效率的变化进行分析,并尝试给出影响机理的初步分析。

## 1 试验描述

风洞试验段尺寸 $4\text{m} \times 3\text{m}$ ,为连续回流式风洞,试验风速 $70\text{m/s}$ 。地效为固定地板模拟。某民机为下单翼,翼吊常规布局,试验模型比例为 $1:14$ ,模型展长 $2\,557\text{mm}$ ,平均气动弦长 $305\text{mm}$ ,参考面积为 $0.646\text{m}^2$ 。通过空中及地效纵向和横航向状态各构型的数据对比,获得地效对纵向和横航向气动特性的影响;同时对比各舵效在空中及地效状态下的数

据,获取地效对舵效的影响。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 试验重复性

为验证风洞流场的稳定性有必要安排重复性试验以确保数据的可靠性。从表1试验数据来看,升力、阻力及俯仰力矩均达到国军标要求(升力合格指标0.002,阻力合格指标0.0005,俯仰力矩合格指标0.0012),重复性较好。

表1 试验重复性误差列表

攻角(°)	CL 升力系数	CD 阻力系数	Cm 俯仰力矩系数
1	0.0005	0.0001	0.0007
2	0.0003	0.0002	0.0008
3	0.0006	0.0002	0.0007
4	0.0003	0.0002	0.0004

### 2.2 对纵向气动特性的影响

图1所示为地效对不同构型气动特性的影响,图中“巡航空中”指巡航构型空中试验状态,“巡航地效”是指巡航构型地效试验状态。由图1可知,地效状态下在线性段表现为升力线斜率增加,失速攻角提前约2°;地效使得沿流向逆压梯度增加,当襟翼放下时更为明显,而逆压梯度的增加使得机翼表面分离提前,从而减小了失速攻角。最大升力系数表现为升力线斜率增加和失速攻角的综合效果,对于巡航构型,升力线斜率增加占优势,故地效状态下最大升力系数增加,而对于着陆构型失速攻角的提前使得最大升力系数减小占主导。对于阻力而言,地效和空中状态的极曲线是相交的,地效使得零升阻力增加,升致阻力减小。对于力矩,带地效后焦点后移约0.15b<sub>A</sub>,静安定度增大。

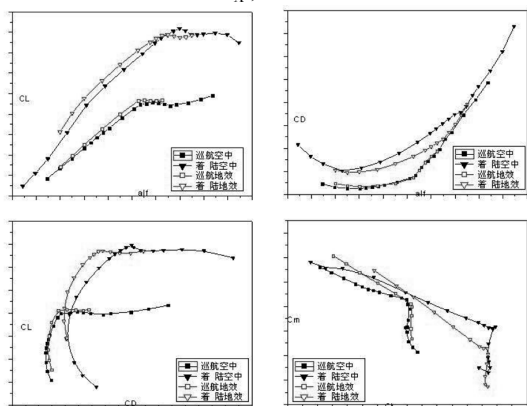


图1 地效对纵向气动特性的影响(无起落架)

### 2.3 对横航向气动特性的影响

表2给出了地效对各构型及攻角下侧向力系数、滚装力矩系数及偏航力矩系数随侧滑角导数的影响。由表2数据可知带地效后使得横向稳定性增加约10%~20%,攻角大于6°巡航构型航向安定性变化不大,着陆构型航向安定性减小约20%。

表2 地效对横航向气动导数影响量(%)

构型	$\alpha$	$C_{Y\beta}$ (横向静安定度)	$C_{N\beta}$ (航向静安定度)	$C_{Y\beta}$ (侧力系数对侧滑角导数)
巡航	0	20.08	23.58	21.76
	6	10.07	1.36	9.55
	9	20.86	-0.69	9.25
着陆	0	29.02	25.34	-83.04
	6	16.13	-21.63	-82.29

对于横向稳定性,垂尾约占25%,翼身组合体所占比例较大。翼身组合体对横向稳定性的贡献主要由几何尺寸(后掠角、上反角、扭转角、展弦比及根梢比)及升力系数决定。在线性范围内,升力系数越大,翼身组合体对横向稳定性的贡献越大。带地效后,线性段升力系数增加使得横向稳定性增加。

### 2.4 对平尾、升降舵效率的影响

地效对飞机平尾及升降舵效率的影响关系到飞机着陆后的配平及纵向操纵效能。图2及表3所示为地效对平尾及升降舵效率的影响,表4为地效对下洗的影响。

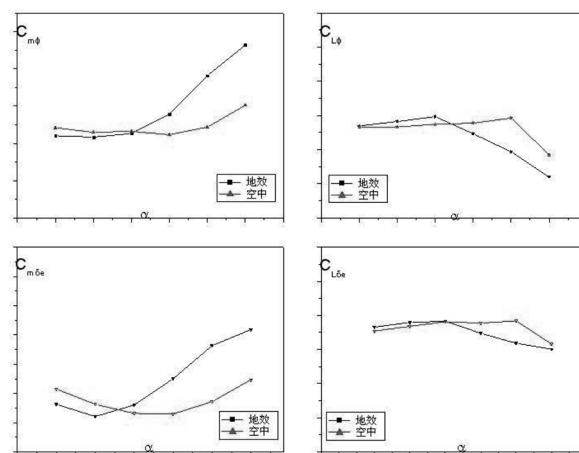


图2 地效对平尾及升降舵效率的影响(着陆构型)

由图2及表3数据可知地效状态下,在攻角超过9°后平尾及升降舵效率下降较大,如在12°时,平尾效率下降接近25%。分析可能原因是地效状态

(下转第77页)

分析与设计[M].北京:北京航空航天大学出版社,1990.  
 [2] 焦景堂.航空机载设备可靠性维修性工程指南[M].北京:北京航空航天大学出版社,1993.  
 [3] [日]市田嵩,铃木和幸编著.郭建英,沙巨大译.可靠性分布与统计[M].北京:机械工业出版社,1988.  
 [4] 曾天翔,等译.可靠性设计手册[M].北京:航空工业出版社,1987.  
 [5] 胡昌寿.可靠性工程-设计、试验、分析、管理[M].北京:

宇航出版社,1988.  
 [6] 陆廷孝,等.可靠性设计与分析[M].北京:国防工业出版社,1995.  
 [7] 姚一平,李沛琼.可靠性及余度技术[M].北京:航空工业出版社,1991.  
 [8] 王珍熙.可靠性、冗余及容错技术[M].北京:航空工业出版社,1991.

(上接第 57 页)

下沿气流方向存在一定的逆压梯度,这使得机翼及平尾表面较早分离,另外下洗的抑制也使得平尾当地攻角较大,这也使得平尾分离提前。

表 3 地效对平尾及升降舵效率的影响 (%)

$\alpha$	0	3	6	9	12	15
$C_{mq}$ (平尾效率)	3.76	2.28	0.88	-9.55	-24.82	-32.39
$C_{m\dot{\alpha}}$ (升降舵效率)	7.67	5.81	-3.72	-15.65	-26.39	-26.21

表 4 地效对下洗的影响

	$\varepsilon_0$ (零攻角下洗角)	$\varepsilon_a$ (下洗率)
空中	5.8	0.31
地效	4.7	0.091

由表 4 数据可看出,地效使得零攻角时下洗角减小了  $1.1^\circ$ ,下洗率约减小为空中状态的  $1/3$ 。下洗的减小使得翼梢涡的强度得到抑制,能耗降低,阻力减小,该结果也与 2.2 中纵向结论一致。

### 2.5 对方向舵、副翼效率的影响

表 5 地效对方向舵效率  $C_{n\dot{\delta}_r}$  的影响 (%)

	$\beta$	-11	-6	0	6	12
$\alpha=0$	$C_{Y\dot{\delta}_r}$ (侧力系数对方向舵偏角导数)	5.21	4.70	4.99	7.67	8.60
	$C_{n\dot{\delta}_r}$	2.95	2.54	2.28	3.80	3.21
$\alpha=6$	$C_{Y\dot{\delta}_r}$	-2.38	-5.88	-3.03	-2.75	4.26
	$C_{n\dot{\delta}_r}$	1.89	-1.97	-0.86	-1.95	3.24
$\alpha=12$	$C_{Y\dot{\delta}_r}$	-0.39	-2.98	-7.36	-8.04	0.20
	$C_{n\dot{\delta}_r}$	3.69	-0.35	-4.64	-3.51	1.55

表 6 地效对副翼效率  $C_{l\dot{\delta}_a}$  的影响 (%)

$\beta$	-11	-6	0	6	12
$\alpha=0$	8.62	6.59	4.19	2.74	0.31
$\alpha=6$	-6.81	-5.57	-6.96	-4.70	-7.48
$\alpha=12$	-9.38	-13.13	-10.69	-11.20	-9.39

地效对飞机方向舵及副翼效率的影响关系到飞机着陆后的横航向操纵效能。表 5 及表 6 所示为地效对方向舵及副翼效率的影响。方向舵效率  $C_{n\dot{\delta}_r}$  在上述表格攻角及侧滑角范围带地效后变化在 5% 以内。副翼效率的变化稍大,最大达到 13.1%。地效对沿气流方向流场及压力分布影响较大,当侧滑角不大时不至于引起左右较大不对称,故方向舵效率变化较小可能与此相关。

## 3 结论

本文通过对下单翼翼吊常规布局某民机进行地效试验,获取了地效对纵横向及舵效的影响。地效使得零升阻力增加,抑制了翼梢涡故升致阻力减小。地效使得沿气流方向有逆压梯度,从而使得失速提前、纵向压心后移并且攻角越大地效越明显压心后移越大,故静安定度增大,地效使得焦点后移约  $0.15b_A$ ;在线性范围内,升力系数越大,翼身组合体对横向稳定性的贡献越大。地效使得线性段升力系数增加使得横向稳定性增加约 10% ~ 20%,攻角大于  $6^\circ$  巡航构型航向安定性变化不大,着陆构型航向安定性减小约 20%,地效在攻角超过  $9^\circ$  后平尾及升降舵效率下降较大,方向舵效率变化不大,副翼效率在攻角  $12^\circ$  时下降约 10%。

### 参考文献:

[1] Arron Melvin and Luigi Martinelli. Aerodynamic Shape Optimization of Multi-element Airfoils in Ground Effect, 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit [C]// Reno, Nevada, January 2008.  
 [2] Juhee Lee etc. Optimization of Wings in Ground Effect Using Multi-Objective Genetic Algorithm [C]// 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, Orlando, Florida, January 2010.