

doi: 10.7690/bgzdh.2023.10.007

# 某开口回流式低速风洞固定地板结构优化

孙福振, 刘江涛, 赵佳锡, 傅 浩

(中国空气动力研究与发展中心低速空气动力研究所, 四川 绵阳 622722)

**摘要:** 针对低速风洞固定地板对地效试验数据质量和试验效率的影响, 采用 CFD 计算方法优化设计固定地板的吸除缝及其整流前缘的结构参数。基于非接触测控方式, 设计固定地板随动密封装置; 在低速风洞中, 通过试验对优化后固定地板上方的风洞落差系数及附面层厚度进行测量。结果表明: 在常用风速下, 优化后固定地板模型区域的附面层厚度能够满足地面效应实验的要求。

**关键词:** 低速风洞; 固定地板; 附面层吸除缝; 随动密封; 地效试验

**中图分类号:** V211.74 **文献标志码:** A

## Structural Optimization of Fixed Floor of Certain Type Low Speed Wind Tunnel with Open Reflux

Sun Fuzhen, Liu Jiangtao, Zhao Jiayi, Fu Hao

(Low Speed Institute, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 622722, China)

**Abstract:** In view of the influence of the fixed floor of low speed wind tunnel on the data quality and test efficiency of ground effect test, the structural parameters of the suction seam and the fairing leading edge of the fixed floor are optimized by CFD calculation method. Based on the non-contact measurement and control method, a fixed floor follow-up sealing device was designed. In the low-speed wind tunnel, the wind tunnel drop coefficient and boundary layer thickness above the optimized fixed floor were measured through the test. The results show that the boundary layer thickness of the optimized fixed floor model can meet the requirements of the ground effect experiment under the common wind speed.

**Keywords:** low speed wind tunnel; fixed floor; boundary layer suction joint; follow-up seal; ground effect test

### 0 引言

飞机在起飞或着陆过程中, 当距地面半个翼展或更近时, 将明显受到地平面的影响, 这种影响被称为地面效应<sup>[1]</sup>。地面效应通常会使得飞机的升力线斜率增大、诱导阻力减小、纵向静稳定性增加<sup>[2]</sup>。飞机研制过程中, 必须明确地面对飞机气动性能的影响, 以确保飞机的起降安全, 尤其对于短距起降飞行器、舰载机以及水上飞机等格外重要<sup>[3-4]</sup>。低速风洞试验是地面效应测量的主要途径, 例如旋翼地效试验、喷流试验和不带动力起降试验等<sup>[5-10]</sup>。通常采用固定地板进行地面效应试验。固定地板由于与风洞来流之间有相对速度, 会在表面形成附面层, 使试验结果有一定的误差<sup>[11]</sup>; 因此, 风洞固定地板的结构设计对于飞机地面效应的试验结果具有重要影响, 需要对其进行优化。

中国空气动力研究与发展中心的 FL-14 风洞是开口回流式低速风洞<sup>[12]</sup>, 由于型号研制需求, 原固定地板已不能满足地面效应试验对于附面层和试验效率的要求。为了提高风洞试验质量和效率, 笔者

对 FL-14 低速风洞的固定地板开展了结构优化。利用数值计算对比不同外形设计时, 固定地板附面层的厚度分布情况, 开展优化设计。根据地面效应试验支杆运动过程, 采用非接触测量与控制的方式, 设计了随动密封装置。在 FL-14 风洞中安装优化后的固定地板, 试验测量地板上模型区的落差系数与附面层厚度。

### 1 固定地板外形优化设计

固定地板外形影响地面效应的实验模拟效果以及测量数据准确性, 通过数值仿真的方法, 优化固定地板的外形设计方案。仿真计算时, 采用基于密度的 2 阶精度隐式算法与 SST 2 方程模型来模拟固定地板台面流场的湍流; 计算使用 2 维模型, 模拟风速为 70 m/s; 计算采用四边形结构网格, 网格单元数目为 17 万。开展附面层吸除缝及前缘整流方案的优化设计。

#### 1.1 附面层吸除缝数值分析与优化

固定地板附面层可以增加吸除缝进行控制, 吸

收稿日期: 2023-06-01; 修回日期: 2023-07-05

作者简介: 孙福振(1981—), 男, 辽宁人, 硕士。

除缝的优化设计分 3 种情况计算：第 1 种无吸除缝；第 2 种将地板分为 2 块，长度均为 2.25 m，吸除缝宽度 5 mm；第 3 种将地板分为 3 块，第 1 块长 1.2 m，第 2 块长 2.1 m，第 3 块长 1.2 m，吸除缝宽度均为 5 mm。图 1、2 所示，分别为单/双吸除缝的网格划分，其中缝宽均为 5 mm。

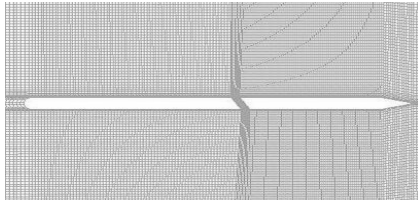


图 1 单吸除缝地板方案计算网格

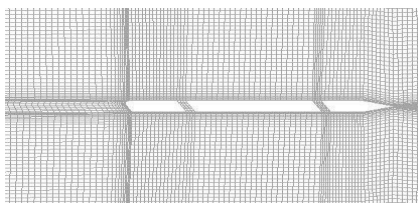
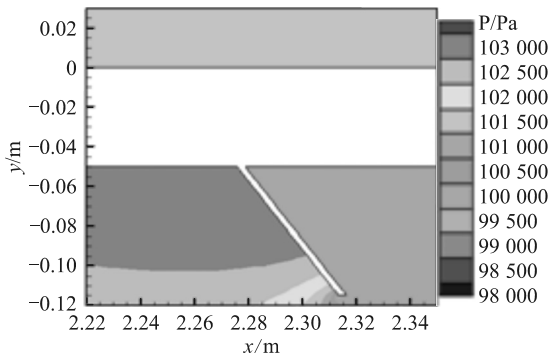
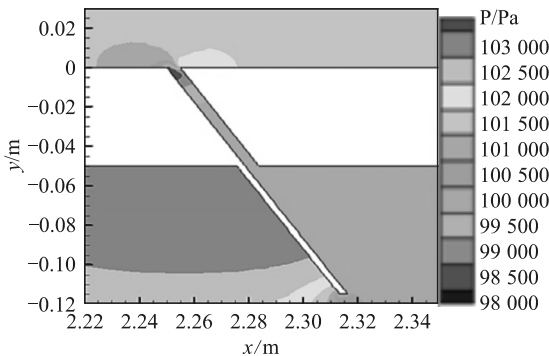


图 2 双吸除缝地板方案计算网格

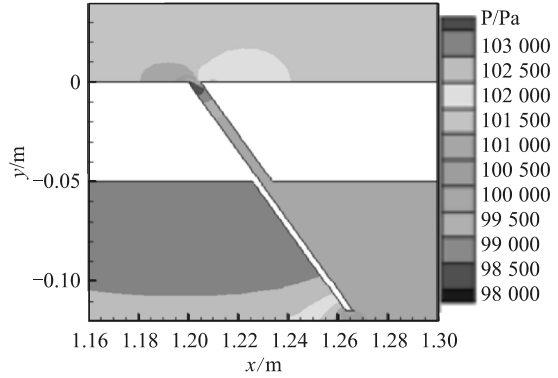
当地板增加了吸除缝之后，地板上方有明显的压力波动，吸除缝内有低压区，进而使得上方部分气流被吸除，图 3 所示为不同吸除缝设计方案中导流片处的压力分布。CFD 计算得到的不同吸除缝设计方案地板附面层厚度分布曲线如图 4 所示，模型区附面层厚度值如表 1 所示，其中风洞试验时，常用模型区域为距离地板前缘 1.3~3.3 m 之间。



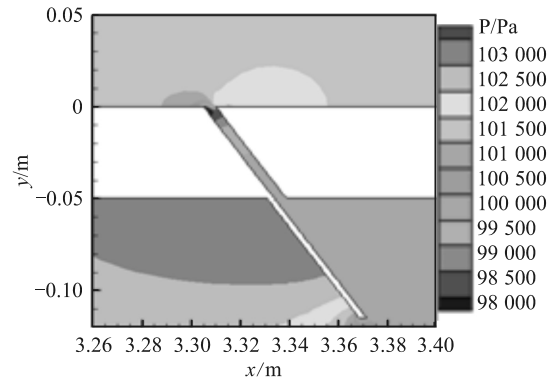
(a) 无吸除缝导流片



(b) 中间吸除缝导流片



(c) 地板两侧吸除缝的第 1 个导流片



(d) 地板两侧吸除缝的第 2 个导流片

图 3 不同吸除缝算例导流片处压力分布

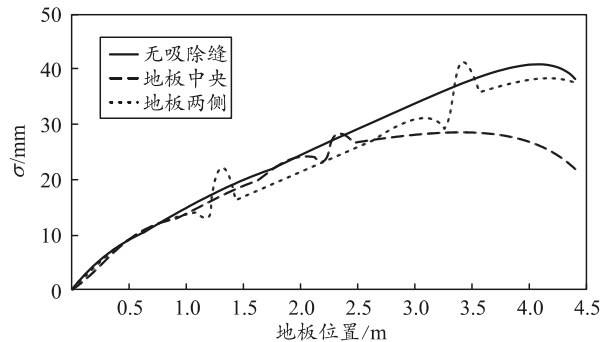


图 4 不同吸除缝算例的附面层厚度分布

表 1 不同吸除缝的模型区附面层厚度 mm

吸除缝位置	无	地板中央	地板两侧
附面层厚度	18~38	18~29	16~32

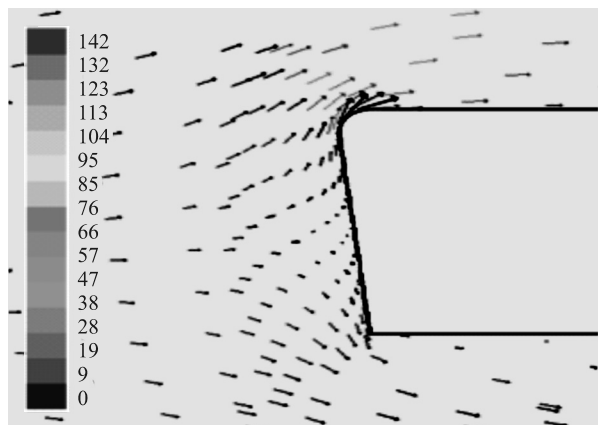
仿真结果表明：有吸除缝时模型区附面层厚度更低，并且附面层厚度随地板位置的变化更小，附面层厚度值更稳定；但当在地板中设置吸除缝时，附面层厚度会在该点出现跳跃。地板前后各开一个吸除缝可使模型区附面层厚度更稳定，但前后跳跃点会影响气流变化。综合考虑地板附面层及模型地效试验侧滑角影响，最终采用无附面层吸除缝的整体台面方案。

### 1.2 前缘形状整流效果分析

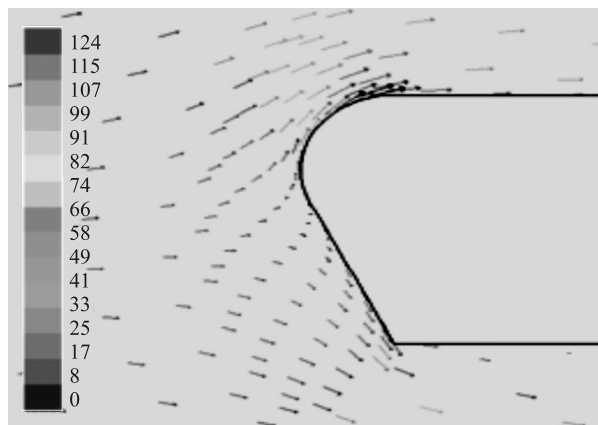
前缘剖面半径对于附面层有整流效果，仿真计

算前缘剖面形状的半径分别为 5、15 和 25 mm 等 3 种倒角方案。根据 CFD 计算结果，随着前缘半径增加，前缘速度变化降低，且更好地沿地板上表面流动，如图 5 所示。不同前缘算例附面层厚度曲线如图 6 所示，模型区附面层厚度值如表 2 所示。

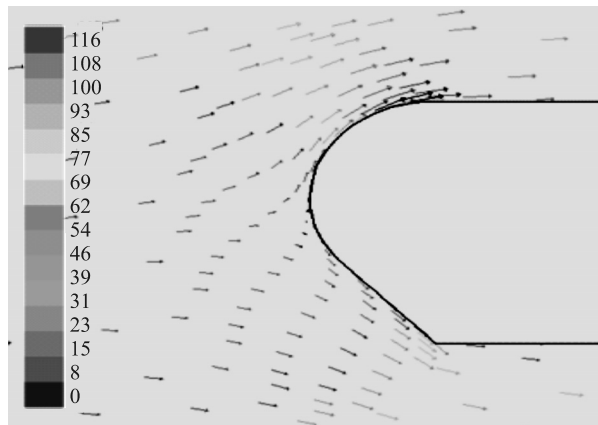
当前缘剖面为 15 mm 的倒角时，模型区附面层厚度更加稳定，变化最小，附面层厚度也相对较低；因此，采用前缘剖面形状为 15 mm 倒角的整流设计方案。



(a) 前缘半径 5 mm



(b) 前缘半径 15 mm



(c) 前缘半径 25 mm

图 5 不同前缘算例前缘速度分布(单位：m/s)

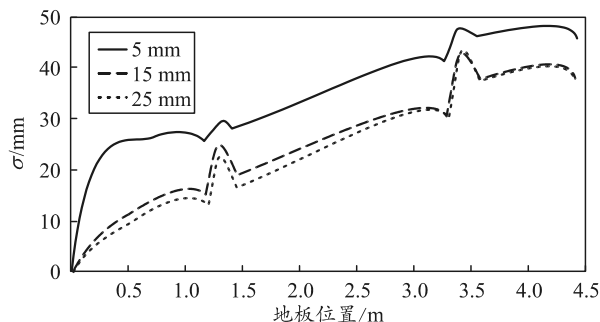


图 6 不同前缘算例附面层厚度

表 2 不同前缘的模型区附面层厚度 mm

剖面半径	5	15	25
附面层厚度	28~42	19~32	16~32

## 2 支杆随动密封优化设计

如图 7 所示，在开展地效风洞试验时，支杆必须穿过固定地板装置并前后移动；因此，必须设计随动密封装置随支杆前后运动以遮蔽空隙，防止地板台面上下窜气。为达到较好的随动密封效果，采用非接触测量与控制技术设计装置。

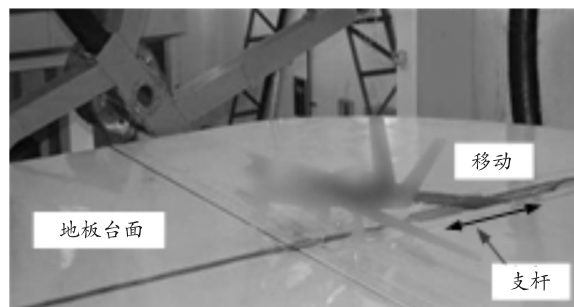


图 7 飞行器地效实验

### 2.1 支杆随动密封装置组成

如图 8 所示，随动密封装置由控制和机械 2 部分组成：控制部分由驱动器、交流伺服电机和激光传感器等组成；机械部分由框架、前后随动机构、传感器、上盖板和随动板等部件组成，作为整体安装在地板台面接口上。前后随动机构包括直线导轨滑块副、减速电机、齿轮齿条等部分，其驱动随动板跟随模型支杆运动实现随动密封。

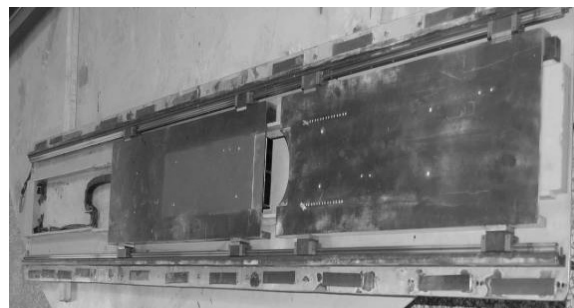


图 8 随动密封装置

### 2.2 随动密封装置控制系统

随动密封装置中，随动板必须时刻跟随模型支杆运动，保持较近的距离，且不发生碰撞；因此，需要进行系统响应时间和安全距离设计。

控制部分主要组成如图 9 所示，其中：2 个激光传感器检测随动板与模型支杆的相对位置，输出电平信号；驱动器工作于“内部设定速度选择”模式，可根据接点输入信号自动判断支杆运动方向和速度；交流伺服电机通过“齿轮+齿条”驱动密封板滑动，可实现随动密封的快速响应。

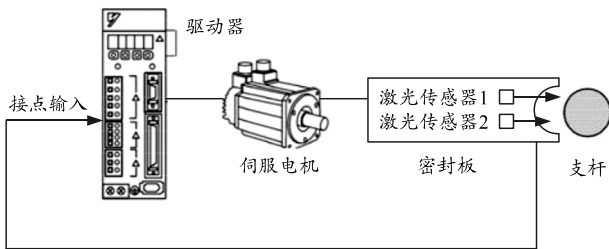


图 9 随动密封装置控制系统

如图 10 所示，根据 2 个激光传感器与模型支杆相对位置的不同情况，可能存在以下 3 种工况：1) 随动板距离支杆较远，电机驱动随动板向靠近支杆方向运动，直到进入工况 2；2) 随动板和支杆距离在正常范围，电机停止运行；3) 随动板距离支杆太近，随动板向远离支杆方向运动，直到进入工况 2。

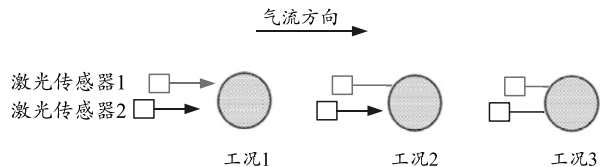


图 10 随动密封装置工作示意图

系统响应时间为装置工况发生变化到控制系统作出响应间的时间延迟，主要包括激光传感器和伺服电机的响应时间；因此，为保证支杆运动后不与随动板发生碰撞，两者之间必须预留足够的距离。

## 3 带固定地板风洞流场参数测量

### 3.1 风洞落差系数测量

带固定地板的风洞落差系数利用 2 台微压计进行测量，其中，微压计 B 与模型区中心的标准风速管相连，微压计 A 与试验段入口处参考点和稳定段参考点相连。风洞启动后，同时测出 2 台微压计的压力值，再将 A、B 2 台微压计对换，重复上述测量。落差系数测量试验如图 11 所示，需要针对 3 种不同地板高度，在常用风速下对风洞落差系数进行测量计算，最终确定其落差系数。

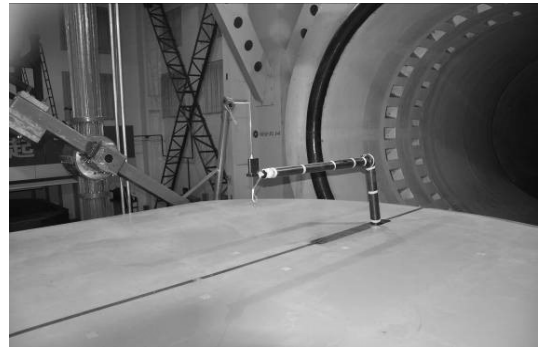


图 11 带固定地板风洞落差系数测量

### 3.2 固定地板附面层测量

如图 12 所示，地板附面层厚度常用压力测量耙进行测量，最下端的测压管离地板上表面距离大于等于 5 mm。测量耙可以沿 X 方向改变测量位置。本次试验测量 5 个不同位置。风洞运行时，利用电子扫描阀采集并记录测量耙上各压力孔的压力值，根据实验结果计算，一般将从地板上表面开始到速度为外流速度 99% 处以内的这一段距离定义为附面层厚度。

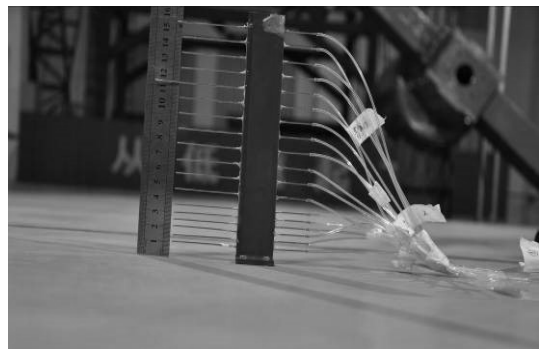


图 12 固定地板附面层厚度测量

### 3.3 风洞试验测量结果

固定地板安装调试完成后，对微压计重新加酒精并校准零点后进行试验，测量地板高度分别为 0、67、267 mm 时，在 60 m 风速下的落差系数。测量结果经过计算后，最终确定所有高度的风洞落差系数均为 1.312，满足风洞试验要求。

如表 3 和 4 所示，固定地板高度分别为 0.32 和 0.52 m 时，附面层厚度的测量结果与数值仿真结果的变化规律一致，但在数值上有一定差别。模型中心前 1.1 m 到模型中心后 0.55 m 之间的区域内，附面层厚度符合实验要求；但是，模型中心后 1.1 m 处附面层略高。考虑到实际风洞试验中，该位置已不在模型区域，故认为固定地板附面层厚度对试验结果无影响。

表 3 地板高度为 0.32 m 附面层厚度 mm

风速/ (m/s)	模型中心 前 1.1 m	模型中心 前 0.55 m	模型 中心	模型中心 后 0.55 m	模型中心 后 1.1 m
50	25	30	35	45	55
60	21	30	35	35	55
70	21	25	35	35	45

表 4 地板高度为 0.52 m 附面层厚度 mm

风速/ (m/s)	模型中心 前 1.1 m	模型中心 前 0.55 m	模型 中心	模型中心 后 0.55 m	模型中心 后 1.1 m
50	25	30	45	45	55
60	21	30	35	35	45
70	21	25	35	35	45

## 4 结论

笔者对固定地板的结构开展了优化研究，设计了非接触式测距随动密封装置。优化后的固定地板，使低速风洞的关键性能参数满足实验要求，具有安装维护方便、响应时间快以及干扰影响小等优点。该固定地板解决了支杆在地板中自由运动的关键难题，并得到以下结论：

1) 吸除缝可以使模型区附面层厚度更低，并且附面层厚度随地板位置的变化更小，附面层厚度值更稳定；

2) 吸除缝会使附面层厚度在吸除缝位置出现跳跃，影响气流变化；

3) 地板前缘半径增加会使得前缘速度梯度降低，气流更好地沿地板上表面流动，进而使地板上方的附面层状态更优；

4) 非接触式支杆随动密封装置能够避免模型支杆与密封装置的直接接触，有效地适应不同类型

的支杆，具有良好的使用性和维护性。

## 参考文献：

- [1] ALAN P, JOHN J P. 低速风洞试验[M]. 北京：国防工业出版社，1977：301-303.
- [2] 王铁城，吴志成，肖人熙，等. 空气动力学实验技术[M]. 北京：国防工业出版社，1986：138-139.
- [3] 徐彦军，李翼鑫. 地面效应对着舰精度的影响及操控策略[J]. 兵器装备工程学报，2011(12): 117-119.
- [4] 张传侠，吕水燕，谢波涛. 强地效环境下有翼火箭侧翼气动特性研究[J]. 兵器装备工程学报，2018(9): 89-92.
- [5] 方跃，周治宇，张连河. 地效试验数据的估算研究[J]. 绵阳：实验流体力学，2015，29(1): 60-65.
- [6] 李明，王玉成. 直升机动态地效空气动力学试验研究[J]. 景德镇：直升机技术，2009，155: 116-120.
- [7] 林海. 飞机地面效应及其试飞方法[J]. 西安：飞行力学，1996，14(4): 52-58.
- [8] OLSON W M, COLGREN R D. Ground effect determination of a piper Comanche[R]. AIAA, 2003-5316.
- [9] CURTIS P. A review of the status of ground effect/environment technologies[R]. AIAA, 2002-5985.
- [10] MORRIS S, BUTLER R, SLANE J. Analysis of a hover-wing in ground effect[R]. AIAA, 2008-431.
- [11] 胡天勇. 低速风洞活动地板关键技术研究[D]. 长沙：国防科技大学，2007：1-3.
- [12] 刘赞. 风洞地效试验台面自动升降装置控制系统研制[D]. 绵阳：西南科技大学，2018：4-5.