

低速风洞均匀抽吸地板系统*

易仕和 陈 宏 邹建军 吴桂馥

(国防科技大学航天技术系 长沙 410073)

摘 要 在 KD-03 低速风洞中研制了一种附面层可人为地控制的均匀抽吸地板系统。在不同来流速度和不同抽吸系数条件下,对均匀抽吸地板上附面层速度分布进行了实验研究。实验结果与理论计算结果一致。在该地板上的高速列车模型风洞实验的结果与国外同类模型在移动带地板上的实验结果一致。利用均匀抽吸地板可有效地消除附面层的影响,从而提高模型风洞实验气动力的试验精度。

关键词 均匀抽吸地板,地面效应,附面层,风洞实验

分类号 V211.74

A Plate System with Uniform Suction in Low Speed Wind Tunnel

Yi Shihe Chen Hong Zou Jianjun Wu Guifu

(Department of Aerospace Technology, NUDT, Changsha, 410073)

Abstract A plate with uniform boundary layer suction is developed, on which the boundary layer can be controlled. The boundary layer velocity distribution on this plate is studied in various main flow velocities and suction coefficients. The experimental results are consistent with the calculation's, and the experimental results of the high speed train models on this plate are also consistent with the foreign results of the similar models on moving ground. The effect of the boundary layer can be eliminated effectively by using uniform suction plate, and thereby the air forces of models can be measured more exactly.

Key words a plate with uniform boundary layer suction, ground effects, boundary layer, wind-tunnel experiment

高速列车模型进行风洞实验时,由于固定地板上附面层的存在,使高速列车的风洞实验不能完全模拟高速列车的实际情况。国内为消除附面层影响,大多采用在固定地板的适当位置开几条吸气缝或吹气缝的办法^[1]。用于研究飞机起降时地面效应问题的局部抽吸地板,国内有过报道^[2]。这些方法对消除附面层有一定效果,但由于抽吸不均匀,不能完全模拟实际情况。

国外从实验上消除附面层影响的方法有许多种,较多采用的是有限长的移动带地板。Max Sardou^[4]等人用移动带地板对车辆模型的地面效应问题进行过研究。移动带地板虽有许多优点,但它结构复杂,造价昂贵,而且亦有自身的不足。国内目前尚没有这类地板。这次对高速列车风洞实验的地面效应进行实验研究,采用了大面积均匀抽吸法。

1 均匀抽吸平板附面层

抽吸系数 $C_q = -V_s/V_\infty$, 其中 V_s 是对应于某个抽吸流量导致地板上方的法向流动平均速度。抽吸导致的气流负向偏角为 $\Delta\alpha \approx \text{tg}\Delta\alpha = |V_s/V_\infty|$ 。

对于平板上抽吸的层流附面层,抽吸时壁面上法向速度分量 $V_s < 0$ 。假设从气流中抽吸的流量非常

* 1997 年 1 月 13 日收稿
第一作者:易仕和,男,1965 年生,工程师

小, 这时可导出 x 向的速度:

$$u(y) = V_{\infty} [1 - \exp(yV_s/v)] \quad V(y) = V_s = \text{常数} \quad (1)$$

对于均匀抽吸的零攻角平板, 即使从前缘开始抽吸, 也只是在离开前缘一定距离上才能得到这样的解, 这段起始长度约为^[5]:

$$x = (4v/V_{\infty}) / (-V_s/V_{\infty})^2 \quad (2)$$

对于具有抽吸的湍流附面层, 也可求出附面层速度分布。当抽吸气系数 C_q 达到某一值时, 在起始长度下游, 沿 x 方向附面层内速度分布保持不变。

2 均匀抽吸地板及其调试

在KD-03 低速风洞中研制的均匀抽吸地板如图1, 地板的上表面均匀地布满与表面垂直的小圆孔, 小孔间距5mm, 孔径0.6mm。地板采用空心结构, 上下表面之间除了若干加强筋之外是空心的, 上表面小孔与驻室相通。驻室通过地板两侧的抽吸管道、阀门与真空罐相通。

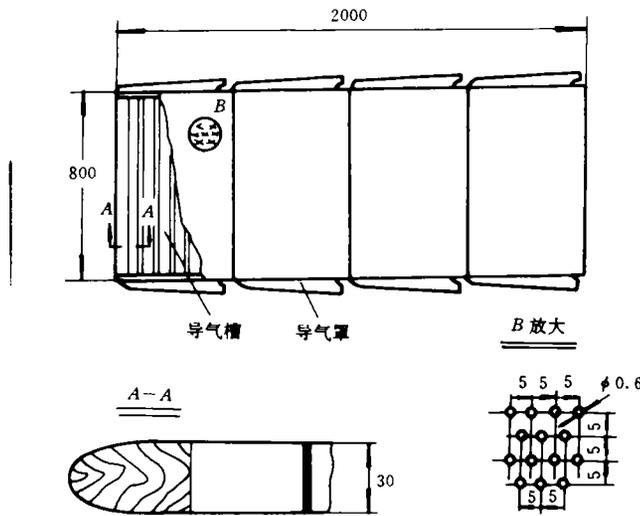


图1 均匀抽吸地板示意图

均匀抽吸地板水平安装在风洞实验段内。附面层内的速度分布与许多参数有关, 这些参数包括抽吸系数 C_q , 测量截面距地板前缘的距离 x , 来流速度 V_{∞} 等等。抽吸地板调试的主要目的, 是要找到某个比较合适的抽吸系数 C_q , 使地板附面层尽可能减薄, 对外流的影响尽可能小, 使抽吸对减薄附面层的效率尽可能高。而且要在抽吸系数 C_q 下, 确定整个抽吸地板上附面层中的速度分布及厚度分布。

在距地板前缘 x 处, 测量出在来流速度 V_{∞} 和不同抽吸系数下的附面层速度分布曲线, 图2是 $x=900\text{mm}$ 位置 $V_{\infty}=30\text{m/s}$ 时, 在不同抽吸系数下附面层内速度分布曲线。由此可知, 抽吸系数增加, 附面层速度分布明显发生变化, 随着抽吸系数的增加, 附面层厚度降低。由图可以发现, $C_q < 0.0057$ 时, 抽吸系数 C_q 对附面层厚度的影响很大, 在 $C_q > 0.0057$ 后, 增大抽吸系数对附面层厚度的影响逐渐减小。这说明, 随着抽吸系数 C_q 的增加, 抽吸效率逐渐减低。实验表明, 这些规律对所测的不同来流速度和不同测量截面都是一致的。

在不同抽吸系数下, $V_{\infty}=30\text{m/s}$, 附面层厚度 δ 沿 x 方向的分布曲线如图3所示。图中曲线(1)和(2)分别是在湍流和层流情况下 $C_q=0$ 时固定地板附面层厚度沿 x 方向分布的理论曲线。由图可知, 在抽吸系数 $C_q=0.0057$ 时, 除起始段外, 沿 x 方向 δ 分布几乎不变, 而且与 $C_q=0$ 时的 δ 分布相比, 附面层明显减薄。而且, 抽吸系数 C_q 增大, $\delta-x$ 曲线进一步降低而靠近 x 轴。

当 $x=900\text{mm}$, $V_{\infty}=30\text{m/s}$, $C_q=0.0057$ 时, 按照理论可算出此时附面层的厚度为 4.8mm , 这与实验值在误差范围内是一致的。对于其它抽吸系数 C_q 和不同位置 x , 计算结果均与实验结果一致。 C_q

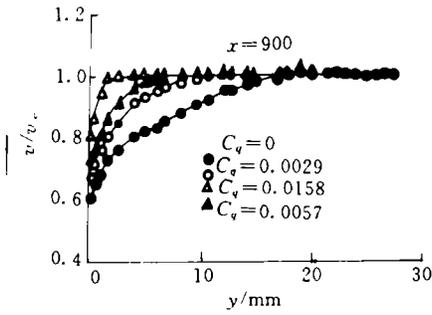
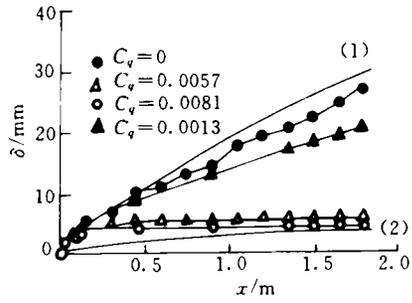
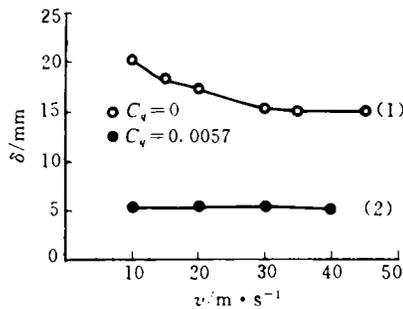


图2 附面层速度分布曲线

图3 附面层厚度 δ 沿 x 方向的分布

$=0.0057$ 时, 地板附面层沿 x 方向以及沿横向在整个地板上都是等厚的, 而且其厚度也大大减薄。

图4 附面层厚度与来流速度的关系 ($x=900\text{mm}$)

在不抽吸 ($C_q=0$) 和抽吸系数为 0.0057 下, 分别测量来流速度 V_∞ 对各截面附面层厚度的影响, 图4是 $x=900\text{mm}$ 处附面层厚度与来流速度的关系。图中的曲线 (1) 是地板不抽吸的情况 (即 $C_q=0$), 曲线 (2) 是抽吸系数 $C_q=0.0057$ 的情况, 由曲线可知, 对于地板不抽吸的情况 ($C_q=0$), 随着来流速度 V_∞ 的增大, 附面层厚度有减薄的趋势, 这与理论是一致的。抽吸系数 $C_q=0.0057$ 时, 随着来流速度的改变, 附面层的厚度没有变化。其它截面测量的结果与 $x=900\text{mm}$ 处的结果一致。

3 均匀抽吸地板上高速列车模型实验的结果

在该地板上对高速列车模型气动力进行了测量。对每一种模型状态, 在不同风速、不同抽吸系数 C_q 以及不同侧滑角的情况下, 对车头模型进行了测力实验。四种模型状态 1、2、3、4 分别为头车 (无裙板)、头车 (有裙板)、头车 (有裙板) + 车厢、头车 (无裙板) + 车厢。实验结果均是在 C_q 为 0.0057 下得到的, 数据已进行了气流偏角和阻塞修正。

附面层吸除使模型负向升力系数、低头力矩系数增加的绝对量几乎并不随侧滑角而变化。附面层吸除对列车模型侧力、偏航力矩和滚转力矩系数的影响相对较小。

附面层吸除使列车模型状态 1 和模型状态 4 的阻力系数增加 $7.6\sim 7.7\%$, 使模型状态 2 和模型状态 3 的阻力系数增加 3% 左右。附面层吸除使模型阻力系数的增量主要与模型底部有关。附面层对列车模型阻力系数及升力系数的影响与模型底部流动结构的改变有关。

4 结论

对均匀抽吸地板而言, 选择抽吸系数 $C_q=0.0057$ 是合适的。这时, 测得抽吸地板附面层厚度 δ 沿

x 方向是不变的。抽吸系数 $C_v=0$ 时, 随着来流速度的增大, 地板上附面层厚度逐渐减薄; 抽吸系数 $C_v=0.0057$ 时, 来流速度对抽吸地板上各点的附面层厚度已没有影响。通过控制地板各段的抽吸系数, 并配合人工转捩等办法, 可对地板附面层厚度分布进行有效的控制。地板附面层对地板上列车模型气动力会产生影响, 其影响的程度与列车模型底部形状有关。该均匀抽吸地板上列车模型实验的主要结果, 与国外移动带地板上同类模型实验结果一致, 说明用均匀抽吸地板可有效地消除附面层的影响, 从而较准确地模拟高速列车模型的气动力。

参 考 文 献

- 1 周亿裕. 风洞地板边界层控制研究的现状和发展趋势. 气动实验与测量控制, 1991 (5)
- 2 于欣芝等. 吸气地板设计及附面层研究. 气动实验与测量控制, 1991 (5)
- 3 易仕和等. 利用均匀抽吸地板进行高速列车模型地板边界层影响的实验研究. 流体力学实验与测量, 1997 (2)
- 4 Max Sardou. The Sensitivity of Wind-tunnel Data to A High-speed Moving Ground for Different Types of Road Vehicles. SAE 880246
- 5 Wulf R. Investigations on A Plate With Uniform Boundary Layer Suction for Ground Effects in the $3\text{m}\times 3\text{m}$ Low-Speed Wind-Tunnel of DFVLR-AVA. AGARD-CD, 1975