



“车窗悖论”的成因及澄清

任少铎

(厦门市海沧区东孚中学 福建 厦门 361000)

(收稿日期:2023-04-18)

摘要:在行驶的车里,以车为参照物,外面的空气流速更大,但以地面为参照物,车内的空气流速更大,根据中学所学的伯努利原理,“究竟是车内还是车外压强更大”成了一个悖论.通过查阅相关资料发现,不能用伯努利原理比较车内外的气压大小,而应当用仿真模拟.根据模拟的结果,气流是双向的,不仅有从车外到车内的气流,也有车内到车外的气流.

关键词:车窗;伯努利原理;流线;仿真模拟

“流体在流速大的地方压强小,流速小的地方压强大”是伯努利原理的主要内容,中学阶段教科书对于这一原理的介绍只是通过大量实验归纳得出,并未介绍其本质和适用条件^[1].中学师生及科普人士往往认为这一规律任何时候都适用,并用其解释一系列的现象,导致了广泛的矛盾和错误,最为经典的矛盾就是“车窗悖论”.笔者查阅相关专业资料,深度分析了伯努利方程的本质及其使用条件,指出了常见的错用伯努利原理的现象,对“车窗悖论”进行了科学严谨的解释,以供广大师生参考.

1 “车窗悖论”及其成因

所谓“车窗悖论”,指的是在行驶的汽车中,打开窗户,气流究竟是流进还是流出车窗.之所以称之为“悖论”,是因为根据流速与压强关系,选择不同参照物会得出不同的结果.以车为参照物,车外空气流速大压强小,空气应该流出车窗;以地面为参照物,车内空气流速大压强小,空气应该流入车窗,如图1所示.

那么究竟车内还是车外的压强更大?气流究竟是流进还是流出车窗?这就形成了一个悖论.

之所以会有这样的“悖论”,是因为中学师生及科普人士往往认为伯努利原理任何时候都适用,从

而随意用其解释各种现象导致的.

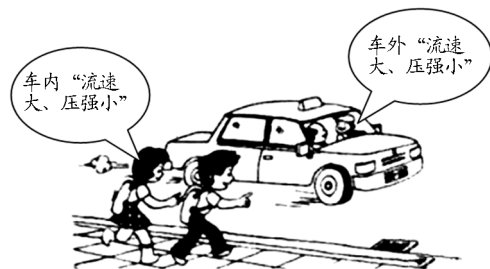


图1 车内车外的人观点不同

2 “车窗悖论”的解释

2.1 伯努利原理分析

要解释“车窗悖论”,需要深入分析伯努利方程.伯努利方程是根据机械能守恒推导出的,其表达式为

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho gh_1 = p_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho gh_2$$

表示流管中的理想流体在流线的两处机械能不变,如图2所示.

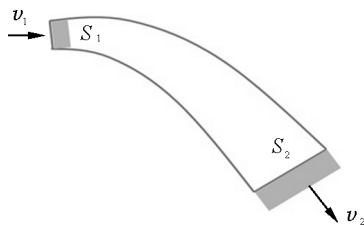


图2 理想流体机械能守恒

伯努利方程也可以写为

$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gh = C$$

式中 C 为常量. 当高度变化可以忽略时, 伯努利方程就变成了

$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 = C$$

这就是伯努利原理(流体在流速大的地方压强小)的由来.

由于伯努利方程是由机械能守恒推导出来的, 因此其适用条件如下:

(1) 不可压缩. 只有流体不能被压缩, 压力做的功才不会转化为流体的内能, 流体机械能才可能守恒.

(2) 无黏滞性. 流体没有黏性(摩擦), 这是保证流体机械能守恒的条件.

(3) 定常流动. 也称为“稳态流动”, 流体在任一点之性质不随时间改变.

(4) 同一条流. 流速和压强的比较必须在同一流线上, 因为流线不同, 流体的机械能可能不同^[2].

以上条件中前3条很多时候都可以近似成立, 但第4条经常被忽略. 根据第4条, 必须在同一流线上才能根据流速比较压强, 也就是说只能“前后”比较而不能“左右”比较. 现实中, 伯努利原理经常被用于比较不同流线上的压强, 这就容易导致错误.

2.2 汽车周围气流的流向分析

显然, 对于行驶的汽车而言, 车内车外的气体并不在同一条流线上. 以车为参照物, 车里的气体几乎不动, 车外的气体从远处流动过来, 车内外的气体并不在“同一条流线”上, 所以不能用伯努利原理比较车内外的气压大小.

空气在流经行驶的汽车时, 黏性变得十分重要, 此时会发生边界层分离(Flow separation)现象, 即车内气体会产生大量涡旋, 如果汽车速度更大甚至会形成湍流(又称为乱流、扰流或紊流). 现实中, 行驶的汽车周围的空气流动非常复杂, 通常用软件仿真模拟去具体研究. 采用图3所示的简化车窗模型, 当车速为 15 m/s 时, 距离地面高度 $Z=1\ 000 \text{ mm}$ 截面的气流速度场如图4所示, 由图4可以看出气流

从车窗的“尾部”进入, 从车窗的前部出去, 在车内形成了一个涡旋. 更为直观简化的气流走向如图5所示^[3].

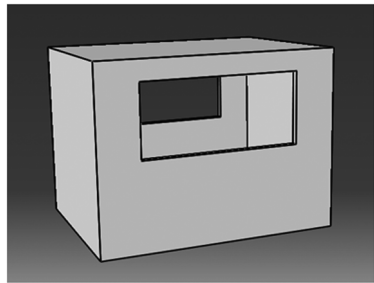


图3 简化车窗模型

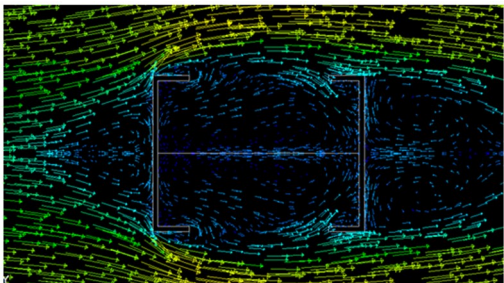


图4 车窗截面流场

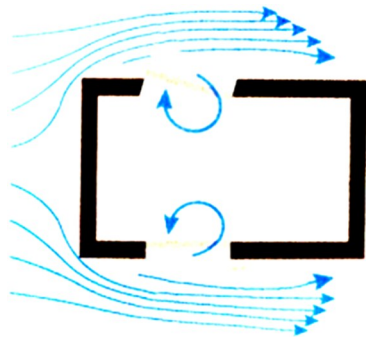


图5 车窗附近的空气流向

仿真模拟的真实尺寸的4车窗轿车高速行驶时, 当车窗全部打开时, 距离地面高度 $Z=1\ 200 \text{ mm}$ 的截面的流场如图6所示^[4].

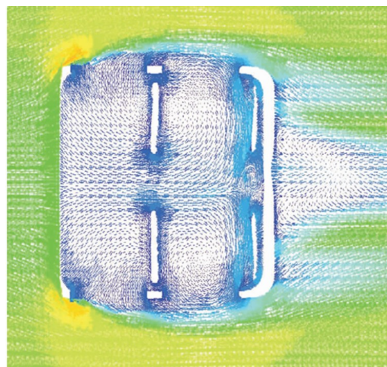


图6 $Z=1\ 200 \text{ mm}$ 的截面流场

由图6可以看出,气流大致是从汽车的两个后车窗流入,从两个前车窗流出.当然,图6只是汽车高速稳定行驶时的气流大致流向,汽车刚启动时,由于惯性气流会从前车窗进入后车窗流出.

根据仿真模拟,对角开窗最有利于车内空气与外界的循环;当汽车高速稳定行驶时,只开方向盘处车窗及右后窗时,距离地面高度 $Z=0.830\text{ m}$ 的流场如图7所示.

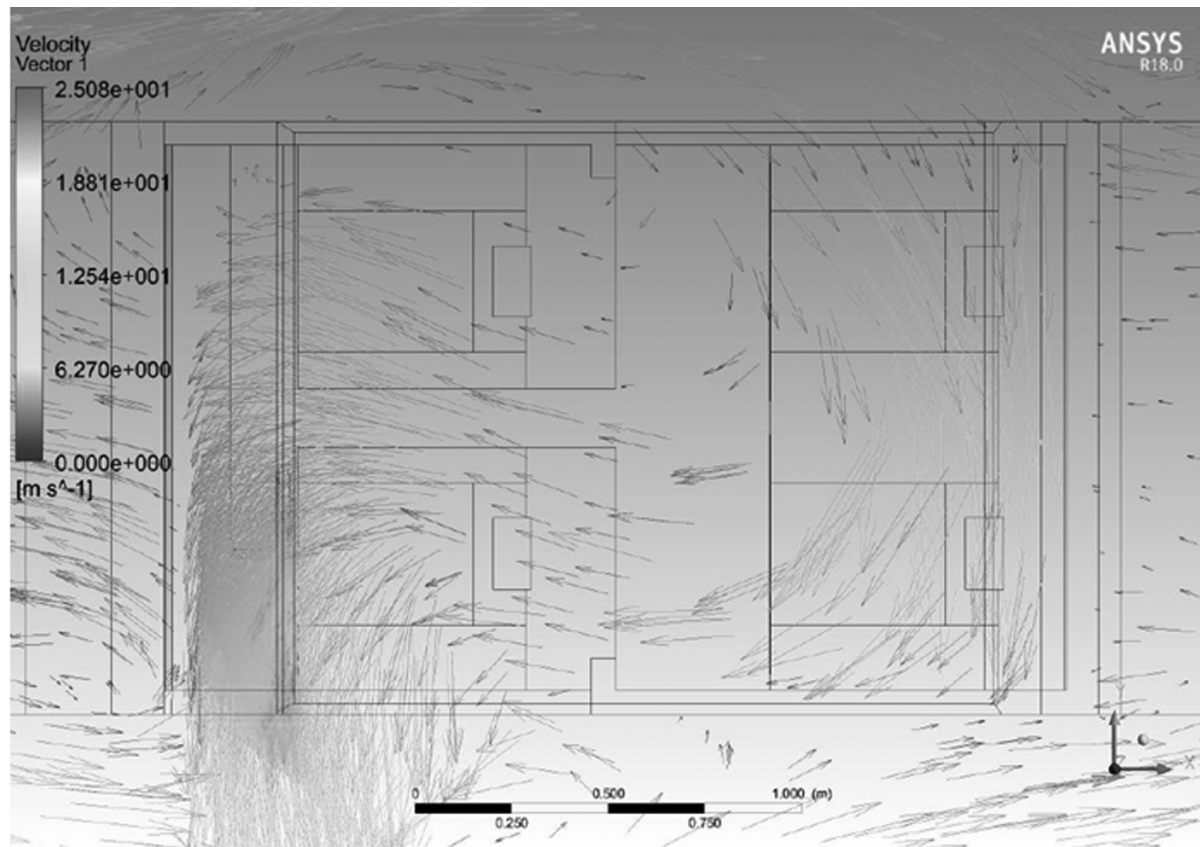


图7 $Z = 830\text{ mm}$ 的截面流场

由图7可以看出气流大致上仍是从后车窗进入,前车窗流出^[5].

正提升^[6].

3 结论与建议

对于高速行驶的汽车而言,分析车内外气流流动时伯努利原理并不适用,此时气流不再是定常流动而是湍流;气流是双向的,不仅有从车外到车内的气流,也有车内到车外的气流,不同的行驶情况和不同的开窗情况气流的大致流向通常不同,总体上,流入的空气量等于流出的空气量.

要给学生一杯水,教师至少要有一桶水.作为学生,可以不用理解那么多,但作为教师,对于生活中常见的物理现象应当有深入的了解,只有这样对于学生提出的“反常”现象,才能给出正确的解释而不是糊弄过去,学生的物理学科核心素养才能得到真

参考文献

- [1] 人民教育出版社,课程教材研究所,物理课程教材研究开发中心.物理八年级下册[M].北京:人民教育出版社,2013:24-26.
- [2] 朱绪力,滕桂荣,陈庆光,等.伯努利定理适用条件分析[J].力学与实践,2014,36(1):92-94.
- [3] 王洪伟.解析流动:画说流体力学[M].北京:人民邮电出版社,2020:32-33.
- [4] 张英朝,李杰,张喆.轿车开窗行驶时的气动阻力分析[J].江苏大学学报(自然科学版),2010,31(6):651-655.
- [5] 闫俊霞.夏季驻车高温后汽车行驶初期开窗通风降温的研究[D].西安:西安工程大学,2018.
- [6] 任少铎.“减小接触面积”还是“增大粗糙程度”?——对胎面花纹的深度分析[J].物理教师,2019,40(8):65-67.