

列车气动阻力问题的实验研究

刘亚晨

(土木工程系)

摘 要 通过水槽的列车模型试验探讨列车气动阻力特性,讨论列车车型对气动阻力的影响,并得知流线型化的列车阻力系数可减少63.2%¹⁹.

关键词 气动阻力;雷诺数;水动力;流线型客车;压差阻力

分类号 TB126

1 引 言

列车运行速度愈高,空气阻力愈大¹⁹国外的试验表明,空气阻力与速度的平方成正比¹⁹日本新干线电动车组的行车速度超过200 km/h 时,空气阻力占总阻力的一半以上¹⁹德国资料介绍,在列车时速达300 km/h 时,空气阻力占总阻力的90%至95%¹⁹因此,如何改善高速列车的体型以减少空气阻力,是减小牵引功率,降低能耗的一个关键问题¹⁹故此,研究高速列车空气动力特性,选择列车最佳外形势在必行¹⁹.

2 关于实验的模拟问题及实验的基本情况

考虑到列车十分细长,而国内高速风洞的试验段一般都不长,要实现多节车厢的模拟,只能改在试验段较长的水槽中进行,即以水代气进行模拟¹⁹本文为确定在水中试验的可行性¹⁹,特安排了风洞常用的组合式模型实验¹⁹实验结果满足王勋村对 Bernard 的修正公式,即 $C_{Di} = 0.86(C_{Di} + nC_{Ds})$ [注: C_{Di} —列车气动阻力系数; C_{Di} —双头车阻力系数; n —车厢节数(不含头车和尾车); C_{Ds} —中间单节车厢阻力系数],通过实验测出 C_{Di} 、 C_{Di} 、 C_{Ds} 值,然后由上述公式求出 C_{Di} ,再求实验 C_{Di} 与计算 C_{Di} 的相对偏差,结果仅为5.8%(13)

实验在武汉交通科技大学流体力学实验室卧式循环水槽中进行¹⁹试验段长为6 m,宽为1.8 m,高为1.45 m,水深0.9 m¹⁹经测定,流场特性基本满足模拟条件¹⁹阻力测试采用电阻应变式测力天平,测力元件线性良好,数据采集用静态电阻应变仪¹⁹.

本文选取我国客车的基本尺寸作为设计模型的标准¹⁹模型缩尺为1/30,实验模型分为两类,每类各六节(见图1示意图):

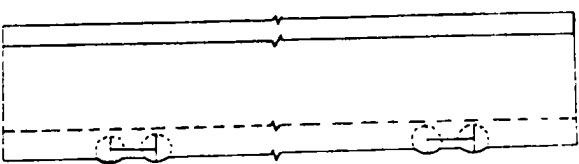
(1) 标准型:采用我国正在营运的客车车型¹⁹主要构造有车体、轮对和相当于转向架的类

似物¹⁹车模由车头和5节车厢组成,外形类似于“方盒子”形¹⁹.

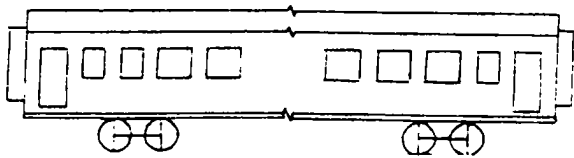
(2) 流线型:外形是参照英国 APT 电动车组以及前苏联“俄罗斯三套马车号”高速列车的技术特点而设计的¹⁹其特点为头车和尾车形状呈三维的流线形,车体侧墙沿铅垂面向内倾斜 2° ,车体中部下面有导流作用的裙板¹⁹主要构件有车体、大风挡以及轮对和大裙板¹⁹车模包括头尾车和4节车厢¹⁹.

实验时,模型由横梁、支杆悬于水槽水面下0.5 m 处,车底面垂直朝向水槽侧壁,并以该侧壁平板来模拟开阔平坦的地面,并考虑了车模底部与地面距离的比例模拟,其实验安装情形见图2所示¹⁹经测定,在天平主支杆附近,地板速度附面层厚约50 mm,地板对主流速度的影响小于4.0%¹⁹.

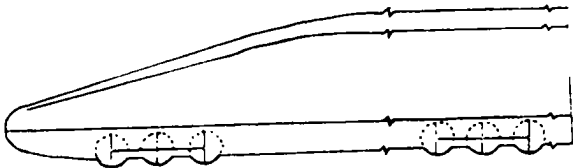
在实验流速(0.17~0.18 m/s)范围内,以模型长度 l 为特征长度的 $R_l = 1.7 \times 10^6 \sim 9.72 \times 10^6$,比相应的实车雷诺数小一个数量级⁽¹³⁾但结果表明,列车各中间车辆的阻力系数基本为常数,这与前人研究结果一致(注:阻力系数定义为 $C_D = 2D/\rho v_0^2 S$,其中 D —总阻力、 v_0 —来流速度、 S —车模横截面积)⁽¹³⁾



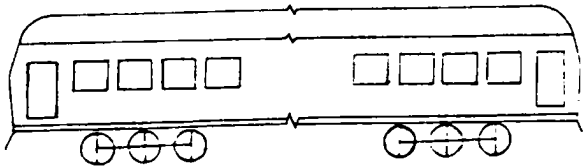
(a) 流线型车厢模型



(b) 标准型车厢模型



(c) 流线型头尾车模型



(d) 标准型头车模型

图1 列车模型示意图

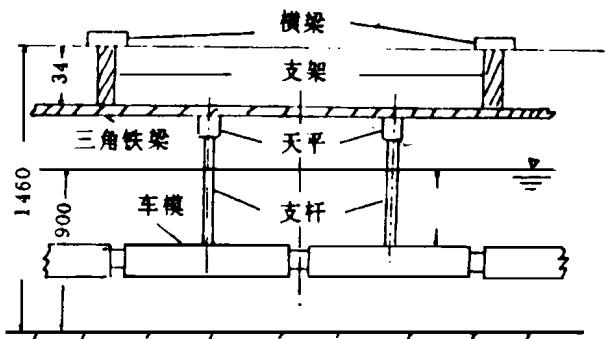


图2 车模组合安装示意图

3 实验结果与分析

3.1 头、尾车阻力系数与中间车辆数的关系

对这一问题的讨论,有助于了解列车气动阻力特性的有效长度,即决定列车气动阻力特性的节数¹⁹本文对标准型头尾车模实验的结果见表1¹⁹.

由表1可见,在不同节数的组合中,头尾车辆及其总和的 C_D 接近于一常数,不因为中间节数的多少而变化¹⁹这表明,列车的气动阻力特性长度只与头尾两节车辆有关,而与列车中间的节数无关¹⁹.

实验同时发现,标准型和双头流线型的头车阻力系数约为尾车阻力系数的2.3和1.8倍¹⁹说明,具有相同外形的头尾车,其头车阻力系数约为尾车阻力系数的2倍¹⁹不过这一结果是否如此,还有待实验进一步证实¹⁹.

3.2 列车车型对空气阻力的影响

列车的外形,随着速度的不断提高,车型由传统结构形式逐步趋于流线型化,以减小气动阻力¹⁹本文在来流速度 $v_0 = 1.5\text{ m/s}$ 的情况下,对两种车型的不同组合进行实验,结果如下:

3.2.1 头车和尾车形状的影响

众所周知,列车头尾部形状主要影响压差阻力¹⁹使列车头尾部流线型化,在于降低压差阻力¹⁹为了了解头尾部形状的影响,对三种不同外形的单头车(有虚设车厢)和双头车(头车+尾车)进行了实验,结果见表2¹⁹.

由表2可见,就单头车来看,B型为最佳,这是因为在B型底部采用了导流装置的裙板,而且外形采用流线型化¹⁹最劣的A型为“方盒子”,B没有采用底部导流,故阻力系数最大¹⁹.

在双头情况,B型比C型的阻力约小69.4%¹⁹这两种车模均采用了裙板,但它们的外形完全不一样,B型头尾车均为流线化,C型头尾车均类似于“方盒子”形¹⁹这表明头尾部采用流线型,具有较大的减阻作用¹⁹.

单头车阻力系数大于相应双头车阻力系数一半(如表2中的B、C型)¹⁹这表明,头车气动阻力中压差阻力所占的比重较大¹⁹另外,从流线型头尾车减阻情况来看,发现头部流线型减阻大于尾部流线型减阻¹⁹.

3.2.2 列车中间车辆形状的影响

这里的列车中间车辆形状是指车体两侧下部是否有导流裙板¹⁹实验选取标准型和流线型5节中的第三节车厢为研究对象¹⁹实验结果表明,有裙板的流线型较无裙板的标准型阻力系数小

表1 标准型头尾车模阻力系数 C_D 对比

车模	节数 n				
	2	3	4	5	6
头车	0.703 4	0.683 2	0.678 9	0.681 8	0.673 8
尾车	0.285 6	0.289 7	0.282 8	0.290 4	0.282 2
头尾车	0.989 0	0.972 9	0.961 7	0.972 2	0.956 0

说明: $v_0 = 1.5\text{ m/s}$

表2 各型单头车和双头车气支阻力系数 C_D

种类	车型		
	A	B	C
单头车	0.684 2	0.182 9	0.661 5
双头车	—	0.287 6	0.939 3

说明:A—标准型头车;B—流线型头车;
C—流线型车厢作头尾车

54%，减阻作用较大¹⁹从中也说明了列车的转向架、轮对等底部结构的压差阻力之和占的百分比达到54%，这与文献[8]的结果一致¹⁹。

3 2 3 列车长度的影响

实验中列车长度用节数 n 来表示¹⁹在来流速度 $v_0 = 1.35 \text{ m/s}$ 的情况下,对三种不同外形车模进行实验,结果见表3¹⁹。

从表3中看出,各型气动阻力系数随节数 n 逐渐增大, C_D 均在 $n-1$ 的基础上加一常数 ΔC_D ,即满足关系式: $C_{Dn} = C_{D(n-1)} + \Delta C_D$ ¹⁹就本文实验模型来看,标准型 $\Delta C_D = 0.1223$,流线型 $\Delta C_D = 0.0631$ ¹³这表明,列车各中间车辆的 C_D 基本为常数¹³

3 3 列车气动阻力及构成部分与雷诺数的关系

本文对列车气动阻力的研究方法如下:

- (1) 总阻力,由实验给出¹⁹ $D = \frac{1}{2} \rho v_0^2 C_D S$ ¹⁹。
- (2) 摩擦阻力 D_f ,由相当于平板的摩擦阻力公式(进行了三维曲面修正) 计算得出¹⁹公式为:

$$C_{Df} = \frac{0.45}{(\lg R_l)^{2.58}} - \frac{K}{R_l} + 0.0016 \frac{L/d}{R_l^{2/5}} + 2 \times 0.0022 \frac{L/h}{R_l^{2/5}}$$

式中 C_{Df} —— 摩擦阻力系数;

R_l —— 列车长度雷诺数;

K —— 取1700;

l, b, h —— 分别为列车长、宽、高

d —— 定义为 $(b + h) / 2$

表3 各型气动阻力系数 C_D

车模	节数 n				
	2	3	4	5	6
标准型	0.975 2	1.098 9	1.252 4	1.375 1	1.464 7
单头车流线型	0.368 2	0.401 3	0.452 2	0.510 5	—
双头车流线型	0.288 5	0.342 1	0.424 3	0.473 6	0.588 8

$$D_f = \frac{1}{2} \rho v_0^2 C_{Df} S$$

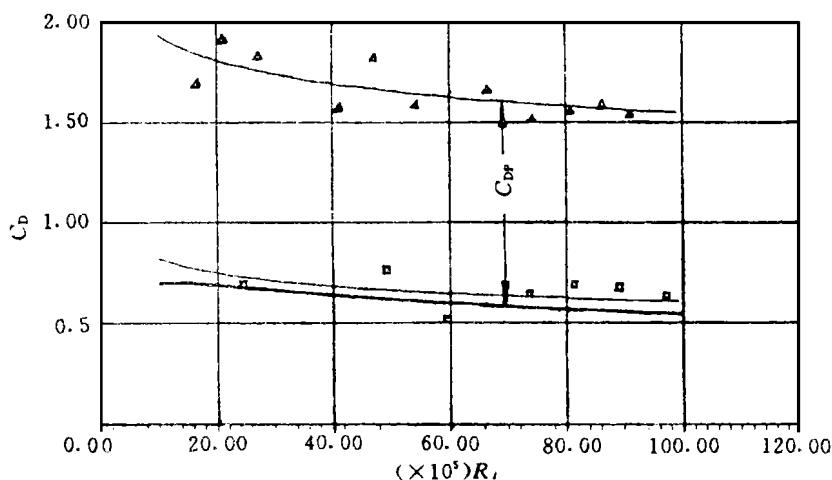
- (3) 压差阻力 D_p ,由 $D_p = D - D_f$ 求得,其阻力系数 $C_{Dp} = 2D_p / \rho v_0^2 S$ ¹⁹。
- 根据上述方法,本文对标准型和流线型各6节车模进行了总阻力实验和摩擦阻力计算(计算公式不分车型,只考虑各自的湿面积),其结果如图3所示¹⁹。

从图3可看出,压差阻力系数近似认为与雷诺数 R_l 无关,也即对一种车型保持为一定值¹⁹。对标准型的 $C_{Dp} = 1.05$,对流线型的 $C_{Dp} = 0.05$ ¹⁹由此可得出,标准型的压差阻力占总阻力的63.2%,而流线型的压差阻力仅占7.6%¹⁹这进一步说明,流线型只能降低压差阻力,且有较大的减阻作用,其值大于40%¹⁹。

二种类型车模的压差阻力系数 C_{Dp} 与 R_l 无关,而两类车模摩擦阻力系数 C_{Df} 基本重合,说明 C_{Df} 与车型(指具有相同湿周面积而言) 无关,只与雷诺数 Re 有关¹⁹因此,列车气动总阻力系数可写成下列形式:

$$C_{D(R_l, \text{车型})} = C_{Df}(R_l) + C_{Dp}(\text{车型}) \text{ }^{19}.$$

上述关系式成立表明,如果能知道某一车型的形状阻力系数,那么再加上相应 Re 下的 C_{Df} ,就可得出总阻力系数 C_D ¹³如,标准型 $n = 2, v_0 = 1.32 \text{ m/s}, R_l = 23.425 \times 10^5$ 时,实验值

图3 $n=6$ 各型 $C_D - C_L$ 关系图

为 $C_D = 1.2156$, 由上得出标准型的 $C_{Dp} = 1.05$, $n = 2$ 时的摩擦阻力系数由公式计算得出 $C_{Df} = 0.1968$, 按上式 $C_D = 1.05 + 0.1968 = 1.2468$, 与实验值相对偏差为 2.5% 可见, 上述关系式可用¹⁹.

4 结 论

关于列车的气动阻力特性, 有许多问题值得研究¹⁹但本文只是涉及了部分问题, 而对边界层的模拟也欠全面¹⁹尽管如此, 本文的工作也还是有意义的¹⁹.

1. 以水作工作流体进行列车气动特性的多节模型实验是以前没有过的¹⁹.

2. 车体形状对阻力的影响, 本文给予了论述¹⁹结果表明:

①列车头尾部压差阻力对头尾部的形状反应很敏感, 且流线型头部比流线型尾部的降值大¹⁹.

②车体裙板, 主要起导流作用, 减阻功能较大, 本文结论可达 46% ¹⁹.

3. 本文讨论了列车每节车模局部阻力, 结果表明:

①列车气动阻力特性的有效长度只与头尾车有关, 与中间车辆节数无关¹⁹.

②列车中间各车辆阻力系数 C_d , 对于定型列车基本为常数¹⁹.

③由 C_D 与 R_L 的关系可知, $C_D = C_{Df}(R_L) + C_{Dp}(\text{车型})$ 的关系式成立¹⁹.

参 考 文 献

- 1 戴荣尧等¹⁹探讨通过水流模型试验进行高速列车空气动力学研究的可行性¹⁹中国铁道科学, 1993(3)
- 2 铁道部第四勘测设计院¹⁹高速铁路¹⁹北京: 中国铁道出版社, 1984
- 3 方昌烈¹⁹国外改善列车气动性能的研究概况¹⁹气动力学杂志, 1982, (2) : 12~13
- 4 王勋村等¹⁹高速列车的气动阻力问题¹⁹气动力学杂志, 1985(4) : 60~64
- 5 Hoerner S F· Fluid-Dynamic drag· Published by the Author· 1965
- 6 Bernard M· French Railway Techniques· 1975: 31~36
- 7 刘亚晨¹⁹列车空气动力特性的水流模型实验研究:[学位论文]¹⁹武汉: 武汉水利电力大学, 1994
- 8 R G Gausthore, ¹⁹Imech Railway Engineer International, May/June, 1978: 7~12

Investigation of Aerodynamic Drag Problems of Railway Trains

Liu YaChen

(Civil Engineering Department)

Abstract This paper gives the results of the experiments on the hydrodynamic force of two types of train models in water channel· By analysis of the experimental results, aerodynamic drag characteristics of trains, and the effects of train shape upon aerodynamic drag are obtained· In the experimental condition the total aerodynamic drag coefficient can decrease by 63.2%.

Key words aerodynamic drag; reynolds number; hydrodynamic force; stream-line model; pressure drag·