

列车气动阻力经验公式的相似理论推导

刘亚晨

(土木工程系)

摘 要 以我国正在运营的客车车型作为模型设计标准,应用相似理论进行量纲分析,建立 π 方程,然后用相似法编制试验程序进行模型试验,再根据相似准则的函数理论建立组分方程式,最后给出了该类客车车型的气动阻力系数计算经验公式^[19]。为具体车型的气动阻力公式提供了一种可行的方法^[19]。

关键词 列车模型;模型试验;组分方程式;相似理论;阻力系数

分类号 TB126

0 引 言

随着列车速度的不断提高,列车气动阻力在基本阻力中的比例以及气动阻力耗功都将急剧增大,故在选择列车最佳外形中,列车气动阻力成为首要考虑的问题^[13]。从目前收集的资料来看,对具体车型的阻力计算公式却不少,且简单实用,但难以推广应用到其它车型^[13]。因此,对某些具体车型的气动阻力进行系统研究,建立列车气动阻力计算公式,得出一个普遍适用的有价值的方法,供设计部门使用,这无疑是有益的^[13]。

列车气动阻力计算经验公式是应用相似理论来推导的,由相似法编制试验程序进行了模型试验是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的,实验基本满足模拟条件,其模型采用我国正在营运的客车车体,主要构造有车体、轮对和相当于转向架的类似物,车模由车头和 5 节车厢组成^[13]。

通过对模型的相似分析,建立相似准则^[13]。一旦相似准则成立,相似准则的函数理论就将试验结果发展成相似准则间定量的函数关系—— π 方程,并可迅速转换成各单一物理间的函数关系——经验公式^[13]。该法适用其它车型的计算经验公式的建立^[13]。

1 列车阻力系数经验公式的相似理论推导

从相似律来看,列车在空气中行驶是一个潜体绕流问题^[13]。主要受空气阻力的作用,策略对这类流动的机理不起作用,阻力主要与沾滞力的作用有关^[13]。故此,描述列车行驶的空气动力特

性的主要物理量可选取 $D、v_0、\rho、\gamma、B、H、l、L$, 即 $f(D、v_0、\rho、\gamma、B、H、l、L)=0$ 各物理量的意义和量纲(采用 FLT) 分别为:

- D --- 列车总阻力, (F) ;
 v_0 --- 行驶速度, (LT^{-1}) ;
 ρ --- 流体密度, (F^2T^{-4}) ;
 γ --- 流体粘度, (L^2T^{-1}) ;
- B --- 每节车厢宽, (L) ;
 H --- 每节车厢高, (L) ;
 l --- 每节车厢长, (L) ;
 L --- 一列列车长, (L) (13)

采用 $v_0、\rho、H$ 作为基本量, 利用量纲矩阵, 就得到无量纲数的函数关系

$$\frac{D}{\frac{1}{2} \rho v_0^2 H^2} = f\left(\frac{v_0 H}{\gamma}, \frac{B}{H}, \frac{l}{H}, \frac{L}{H}\right),$$

考虑到 $\frac{B}{H}、\frac{L}{H}$ 对某一车型来说, 是定值, 故有

$$\frac{D}{\frac{1}{2} \rho v_0^2 B H} = f\left(\frac{v_0 H}{\gamma}, \frac{L}{l}\right) \quad (13)$$

令 $S=(BH)$ --- 列车模型面积; $n=\left[\frac{L}{l}\right]$ --- 列车节数;

$$C_D = \left[\frac{D}{\frac{1}{2} \rho v_0^2 S}\right] \text{ --- 阻力系数; } R_H = \left[\frac{v_0 H}{\gamma} \times 10^{-5}\right] \text{ --- 高度雷诺数(13)}$$

则有 $C_D=f(R_H, n)$ (13)

即模型试验时所需的各个 π 基为 $\pi=C_D, \pi=R_H, \pi=n$ (13)

式中 π 为因变 π 项, 是模型试验的目的; $R_H、n$ 为自变 π 项, 是模型设计与试验时必须遵守的条件(13)由此可得 π 方程

$$\pi=f(R_H, n) \quad (13)$$

本文用此法推导的经验公式适用范围为 $0.4 \leq R_H \leq 2.2, 2 \leq n \leq 6$ (13)

下面以 π 方程来说明经验公式的导出过程(13)

1.1 试验程序编制

在编制试验程序时, 选取 $R_H、n$ 的基准值为 $R_H=1.48, n=4$; 辅助值为 $R_H=1.12, n=2$ (13) 最后得到完整的试验程序如表 1 所列(13)

表 1 试验程序

试验程序	试验条件			试 验 内 容
	变化的	基准的	辅助的	
第一阶段	R_H	n		$(R_H)_3 \overline{\pi} = f(R_H, n)$
	n	R_H		$(n)_2 \overline{\pi} = f(R_H, n)$
第二阶段	R_H		n	$(R_H)_3 \overline{\pi} = f(R_H, n)$
	n		R_H	$(n)_2 \overline{\pi} = f(R_H, n)$

注: $(R_H)_3$ --- 在 n 的基准下, R_H 与 n 的关系;
 $(n)_2$ --- 在 R_H 的基准下, R_H 与 n 的关系 19.

根据表 1 程序进行试验, 并将所得结果化作 π 项值(13)表 2、3 给出了 R_H 和 n 试验计算值, 并绘成曲线图 1(13)

表 2 π 的试验计算

$\pi = R_H$	0.76	1.48	2.2
$lg \pi$	-0.119 190	0.170 260	0.342 420
在 π 时 $(\pi_{\beta})^{-\frac{1}{3}}$	1.110 670	1.219 740	1.289 640
$lg(\pi_{\beta})^{-\frac{1}{3}}$	0.045 585	0.086 267	0.110 468
在 π 时 $(\pi_{\beta})^{-\frac{1}{3}}$	0.906 408	0.966 658	1.004 377
$lg(\pi_{\beta})^{-\frac{1}{3}}$	-0.042 676	-0.014 727	0.001 897

表 3 π 的试验计算

$\pi = n$	3	5	6
$lg \pi$	0.477 120	0.698 970	0.778 150
在 π 时 $(\pi_{\beta})^{-\frac{1}{2}}$	1.089 370	1.355 950	1.517 151
$lg(\pi_{\beta})^{-\frac{1}{2}}$	0.037 175	0.132 244	0.181 029
在 π 时 $(\pi_{\beta})^{-\frac{1}{2}}$	1.065 769	1.312 058	1.487 493
$lg(\pi_{\beta})^{-\frac{1}{2}}$	0.027 665	0.117 950	0.172 455

1.2 组分方程的建立

根据图 1 线性拟合情况,列车阻力模型试验属于双对数型^[13]由曲线可得 π 和 π 的组分方程^[13]

$$\begin{cases} \pi_{\beta} = 1.15 \pi^{0.141}, \\ \pi_{\beta} = 0.65 \pi^{0.467}; \\ \pi_{\beta} = 0.93 \pi^{0.097}, \\ \pi_{\beta} = 0.64 \pi^{0.465} \end{cases} \quad (13)$$

所得组方程的直线性可根据相似准则的函数理论来检验下列等式是否成立

$$\frac{1.15 \pi^{0.141}}{1.219 7} = \frac{0.93 \pi^{0.097}}{0.966 6}$$

把 $\pi = 1.5$ 代入,可得左边 = 0.998 3;右边 = 1.000 7,两者误差仅为 2.4 ‰,可见等式成立,说明线性很好^[13]

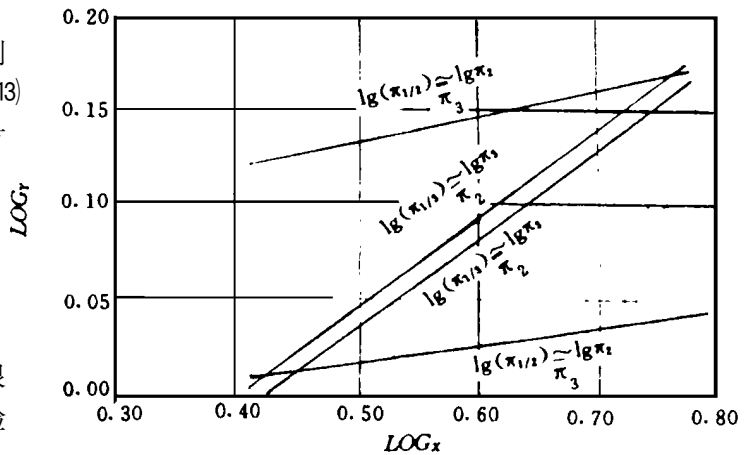
1.3 经验公式推导

当所得组分方程形式一致并具有直线性时,根据相似准则的函数理论, π 方程的函数关系可转变为各 π 间的乘积^[13]于是有

$$\pi = \frac{1}{[f(\pi, \pi)]^{3-2}(\pi_{\beta})(\pi_{\beta})^{19}}.$$

由实验中得, $f(\pi, \pi) = 1.22$, 代入上式,有

$$\pi = 0.613 8 \pi^{0.141} \pi^{0.467},$$

图 1 $lg(\pi_{\beta}) - lg \pi$ 和 $lg(\pi_{\beta}) - lg \pi$ 曲线

即
$$C_D = 0.6138n^{0.467}(R_H)^{0.141} \quad (13)$$

上式就是本文导出的阻力系数经验公式⁽¹³⁾

2 例证和结论

应用经验公式, 计算 C_D 并与实验值比较⁽¹³⁾取 $n=3$, $R_H=1.12$, 则 $C_D=0.6138 \times 3^{0.467} \times 1.12^{0.141}=1.04$, 而实验值 $C_D=1.034$, 两者偏差为 5.8% ⁽¹³⁾这说明经验公式是可行的⁽¹³⁾

由上述推导经验公式的过程, 可得如下结论⁽¹³⁾

(1) 本推导方法得出的经验公式, 反映了 C_D 、 n 和 R_H 的函数关系, 这是在以前阻力公式中没有过的⁽¹³⁾

(2) 本公式只能用来计算指定车型的列车阻力系数⁽¹³⁾对其它类型, 可以用同样方法推导求之⁽¹³⁾

参 考 文 献

- 徐挺¹⁹.相似理论与模型试验, 北京:中国农业机械出版社, 1982
- 许维德¹⁹.流体力学, 北京:国防工业出版社, 1979
- 茆诗松¹⁹.回归分析及其试验设计, 上海:华东师范大学出版社, 1981
- 刘亚晨¹⁹.列车空气动力特性的水流模型实验研究[硕士学位论文], 武汉:武汉水利电力大学, 1994

Similarity Theory Deduction of Train Aerodynamic Drag Experimental Formulas

Liu Yachen

(Civil Engineering Department)

Abstract Taking carriages running in China as the standard of designing models, this paper founds the equations by applying the similarity theory. After making the model test according to the test programme, this paper presents the combined branch equations with the function theory of similarity, and gives the experimental formulas of train aerodynamic drag coefficient calculation.

Key words train model; model test; combined branch equations; similarity theory; aerodynamic drag coefficient