

DOI: 10.3969/j.issn.1001-3881.2014.21.043

## 真空管道运输系统的空气动力学分析及优化设计

汤兆平, 孙剑萍, 吴灵波

(华东交通大学信息工程学院, 江西南昌 330013)

**摘要:** 高速列车在大气中行驶的最高经济速度很难超过 400 km/h, 真空管道运输将是陆上超高速的理想交通工具之一。以高速列车组为研究对象, 基于 Pro/E 建立系统 (ETT) 的参数化模型。分析列车实际运行的边界条件, 在 FLUENT 软件中, 基于  $k-\varepsilon$  双方程湍流模型对系统的外流场、气动阻力场、速度场等耦合条件下进行数值模拟计算, 研究管道压力、行驶速度、车头外形以及阻塞比等参数对其空气阻力、气动升力的影响规律。利用模糊多准则的评价模型对系统主要参数进行优化设计, 为真空管道运输的可行性设计提供参考。

**关键词:** 真空管道运输; 空气动力学; 多场耦合; 优化设计

**中图分类号:** U239.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3881 (2014) 21-164-5

### Aerodynamics Analysis and Optimization Design of ETT

TANG Zhaoping, SUN Jianping, WU Lingbo

(School of Information Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang Jiangxi 330013, China)

**Abstract:** It is hard to exceed 400 km/h that the maximum economic speed of high-speed trains running on the atmosphere, so the Evacuated Tube Transportation (ETT) will be one of the ideal much faster vehicle on land. By taking high speed train set as a research object, based on Pro/E, the parameterized model of ETT system was established. Analyzing the train boundary condition in actual operation, in FLUENT software, based on the  $k-\varepsilon$  double equations turbulence model, the numerical simulation and computation were done under coupling condition which involved many fields such as the outer flow field, the aerodynamic drag field and velocity field. Furthermore, the rules of many parameters affected air-resistance and aero-lift were researched such as the atmospheric pressure in evacuated tube, travel speed, the locomotive's geometry and train-tube dimension ratio. By using of fuzzy multi-criteria evaluation model, the main parameters of system are optimized in design, which provide the reference for the feasibility design of ETT.

**Keywords:** ETT; Aerodynamics; Multi-field coupling; Optimization design

#### 0 前言

随着人们对高速运输市场的需求越来越大, 石油、煤炭等资源日趋紧缺, 发展高速、环保、高效的地面超高速交通对于未来社会交通发展显得十分必要。限制地面高速交通最高经济速度的根本因素是稠密大气, 克服气动阻力是地面高速交通的主要难点。研究表明, 气动阻力与速度的二次方成正比, 当速度达到 400 km/h 以上时, 空气阻力所占比例将超过 80%<sup>[1]</sup>。

真空管道运输系统 (ETT) 作为下一代的交通运输工具, 理论上能在陆地上实现万米高空飞机的效果, 但由于技术和经济条件的限制, 包括真空管道的列车空气动力学问题在内的相关研究较少。目前, 国外对 ETT 的设想主要有两种: 美国 et3.com 公司的 ETT 系统和瑞士的超高速地铁 (Swiss metro)。美国 et3.com 公司只是对 ETT 的总体设想进行了介绍; 瑞士超高速地铁工程研究的方向虽然包含高速车辆与管

道内的空气动力学等问题, 但仅局限于  $1.013 \times 10^4$  Pa, 运行速度为 400 ~ 500 km/h 条件下的列车空气动力学特性。国内仅西南交通大学张耀平等人对真空管道中高速列车空气阻力进行了数值分析的研究<sup>[2]</sup>, 并未对 ETT 系统进行多场的耦合分析, 也没有提出理论参数优化设计。本文作者主要对 ETT 系统进行多场耦合的数值仿真分析, 并就主要参数进行多目标的优化设计。

#### 1 空气动力学分析

基于 Pro/E 环境, 以高速列车为模型参考, 构建系统参数化模型。在多场耦合条件下, 运用 FLUENT 模拟流体流动, 完成列车空气动力学数值仿真分析; 研究管道压力、列车行驶速度以及遮挡系数等多个参数对其空气阻力、气动升力的影响规律。

##### 1.1 系统的参数化建模

管道列车空气动力学性能与列车的外形结构有着密切的关系, 其流线部分的形状和车身过渡曲率等特征

收稿日期: 2013-09-27

基金项目: 江西省教育厅科技项目 (GJJ12287); 江西省 2012 大学生创新创业训练资助项目

作者简介: 汤兆平 (1970—), 男, 教授, 研究方向为交通运输规划、载运工具设计。E-mail: tzp@ecjtu.jx.cn。

直接影响管道列车的空气动力性能, 良好的头部外形曲面设计可有效降低运行时的空气阻力、压力波和气动噪声。由于真实的列车底部和外表面细部特征复杂, 为了简化计算, 在不影响结果的前提下, 对列车模型进行适当的简化。采用三节列车模型进行模拟分析, 即由一节头车 (17.5 m)、一节中间车 (25 m) 和一节尾车 (17.5 m) 组成。利用 Pro/E 参数化技术建立 ETT 系统的物理模型 (图 1), 为下步在超高速空气流场、气动阻力场等多场作用下研究管道阻塞比、车身过渡曲率等系统参数对列车空气动力学的影响提供分析模型。

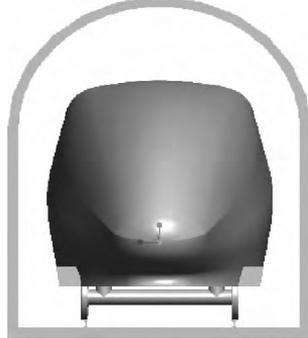


图 1 真空管道系统参数化建模

1.2 网格划分和边界条件

假设列车为光滑的几何体, 不考虑车轮、轨道和轨枕, 并将道床简化为光滑的平面。在不影响列车附近流体的流动条件下, 选用有限的管道长度代替无限长的管道, 同时满足计算区域的边界离列车表面要足够远, 使列车运行所产生的气流对区域边界的流体流动的影响很小。初步建立长为 120 m 的管道, 车头和车尾离管道进出口边界各为 30 m。

将真空管道系统模型导入到 ICEM CFD 中进行列车与管道的网格划分。定义计算域的管道速度进口、压力出口、管道及列车的边界条件 (图 2), 采用非结构四面体网格对 ETT 系统模型进行网格划分。同时检查网格质量满足计算要求, 最后通过 CFD 中的 output 输出网格文件<sup>[3]</sup>。

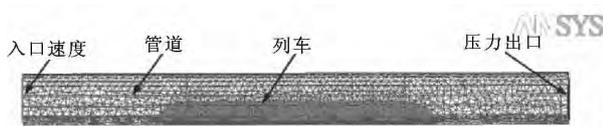


图 2 系统边界条件

1.3 模型建立及计算

1.3.1 定常湍流模型建立

管道列车周围空气流场, 如附面层分离、尾流等带有明显的湍流特点的流动。湍流是一种高度复杂的非稳态三维流动, 具有杂乱、相互交错且随时间变化迅速的轨迹, 带有旋转的不规则流动, 流体内的各种物理参数, 如速度、压力等在时间和空间上发生随机变化。目前在工程计算的湍流数值计算方法主要是雷诺平均法, 计算中只考虑大尺度的平均流动, 湍流模式加以封闭, 使计算量减少<sup>[4]</sup>。

由于高雷诺数流场计算难于收敛, 而且文中采用

不同的列车运行速度和工作压力, 各种工况的马赫数均不同, 故统一按不可压缩的情况处理, 不考虑空气的可压缩性。不可压缩流的基本控制方程为:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

式中:  $u_i$  为列车周围流场速度, 分别代表沿  $x$ 、 $y$ 、 $z$  3 个坐标方向的速度分量;  $x_i$  分别代表  $x$ 、 $y$ 、 $z$  3 个方向坐标。

动量守恒定律也是任何流动系统都必须满足的基本定律。该定律可表述为: 微元体中流体的动量对时间的变化率等于外界作用在该微元体上的各种力之和, 表达式为:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{1}{\rho} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i \partial x_j} \tag{2}$$

式中:  $u_i$  或  $u_j$  分别代表流场速度矢量沿  $x$ 、 $y$ 、 $z$  3 个坐标方向的速度分量;  $x_i$  或  $x_j$  分别代表  $x$ 、 $y$ 、 $z$  3 个方向坐标;  $\rho$  为空气的密度;  $p$  为压力;  $\mu$  为运动黏性系数;  $t$  为时间。

真空管道内气流的雷诺数大于为  $10^5$ , 故其内流场可采用定常湍流模型  $k-\varepsilon$  双方程进行计算。该模型是目前应用最为广泛的湍流模型, 两个传递方程允许湍流速度和尺度独立确定。标准  $k-\varepsilon$  双方程模型是以湍流动能  $k$  和它的耗散项  $\varepsilon$  建立起来的半经验模型, 其中  $k$  方程是个精确方程,  $\varepsilon$  方程是由经验公式导出的方程。 $k-\varepsilon$  湍流模型是一种涡黏性模型<sup>[5]</sup>, 它和代数模型的主要差别在于模型的湍流黏性系数包含了部分历史效应。

湍流动能  $k$  方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \mu_t \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \cdot \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \rho \varepsilon \tag{3}$$

湍流消耗率  $\varepsilon$  方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_1 \mu_t \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \cdot \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \tag{4}$$

式中:  $\mu$  为层流黏性系数;  $C_1 = 1.44$ ,  $C_2 = 1.92$ ,  $\sigma_k = 1.0$ ,  $\sigma_\varepsilon = 1.3$  为经验常数。

湍动黏度系数  $\mu_t$  可表示成  $k$  和  $\varepsilon$  的函数方程:

$$\mu_t = C_\mu \frac{\rho k^2}{\varepsilon} \tag{5}$$

式中:  $\mu_t$  为湍流黏性系数;  $k$  为湍流动能;  $\varepsilon$  为湍流耗散率;  $C_\mu$  为湍流常数, 一般情况下取  $C_\mu = 0.09$ 。

将连续方程、雷诺方程、湍流黏性系数定义、 $k$  方程和  $\varepsilon$  方程构成一组封闭的方程组, 结合一定的初始边界条件, 便可以对实际问题进行数值模拟。

### 1.3.2 计算分析

首先对求解控制器进行设置。由于压力基求解器的应用范围覆盖低压不可压缩流到高速压缩流，需要的内存也少，求解过程灵活，收敛速度远远高于密度基求解器，因此采用基于压力求解。

流体材料选择空气，固体列车为铝合金材料。由于研究列车在管道中高速运行比较困难，因此假设列车在管道中静止，利用空气在管道中相对流动来代替列车在管道中行驶。

管道压强是决定系统参数的关键问题，与速度直接相关。飞机在 9 000 ~ 12 000 m 高空以 1 000 km/h 左右的速度飞行是最经济的，该处气压为 20 ~ 30 kPa。空气阻力将随着速度提高而增加，但随压强降低而下降。如果管道列车速度选为 600 ~ 1 000 km/h，管道压强取 10 kPa 左右，即可在地面创造 10 000 ~ 15 000 m 高空的条件。我国 ETT 的战略定位为 600 ~ 1 000 km/h 超高速地面交通<sup>[1]</sup>，因此文中设定进口空气流速为 800 km/h，出口的表压力设置为 0，管内气压初定 0.2 个大气压。假设管壁和列车表面为光滑的，进出口端流动能  $k$  和湍流耗散率  $\varepsilon$  设为  $k = 1 (m^2/s^2)$ ， $\varepsilon = 1 (m^2/s^3)$ 。

设置求解条件监视器，使用一阶、二阶迎风离散格式将控制方程离散后，采用压力修正算法 (SIMPLE) 选择稳态求解，对真空管道系统进行数值计算，观测气动阻力曲线和列车升力曲线的收敛状况，并通过最终计算得到稳态结果。

## 2 结果分析

### 2.1 外流场气动阻力分析

经过 Fluent 流体模型的计算，可以得出车头曲率为 0.15，阻塞比为 0.1，速度为 800 km/h，管道内气压为 0.2 个大气压条件下列车车头表面压力分布云图和车尾表面压力分布云图 (图 3、4)。

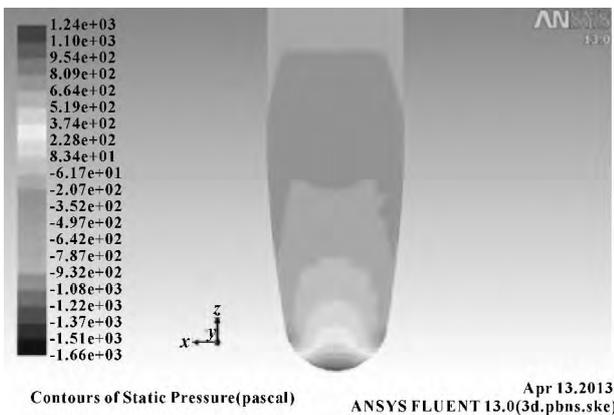


图 3 车头表面压力云图

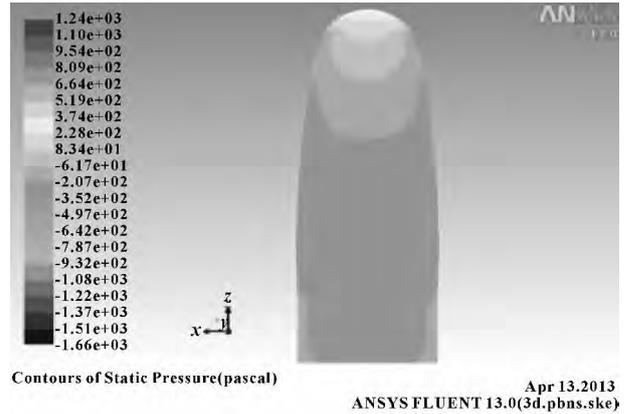


图 4 车尾表面压力云图

从图 3、4 中可以发现，车头部分压力梯度明显，鼻尖部分是整个列车中压力最大的。由此处向上及两侧，正压逐渐减小变为负压，在车头向车身过渡处的顶部与侧面弧面处，呈浅绿区，压力变化最大，负压达到最大值。这主要由于高速列车头部向车身过渡曲率变化，使流体绕流速度加快，造成这区域的压力急剧降低。到达中间车时，头车车身、中间车和尾车车身，车顶及侧墙表面空气压力基本上为负值。车身中段绝对值较小，压力变化不明显。在尾车靠近头部和尾部，由于过绕流的影响，绝对值稍大，但压力变化较小，等压线稀疏，压力梯度小，尾车头部有较小的正压出现，这是由于空气黏性的作用和尾部旋涡的影响。分析结果表明简化模型的合理性。

### 2.2 外流场速度流线图分析

列车对称面上的速度矢量分布如图 5、6 所示，列车前缘鼻部是滞止点，此处压力达到最大，速度比较小。沿列车表面，气流速度逐渐增加，在列车车头和车尾负压区域，气流速度达到最大值，压力变化最大，产生明显的负压。在列车中部表面，压力、速度都比较平稳。在列车尾部，由于列车的高速行驶而产生涡流，导致列车车头和车尾产生负真空，即列车存在压力差。

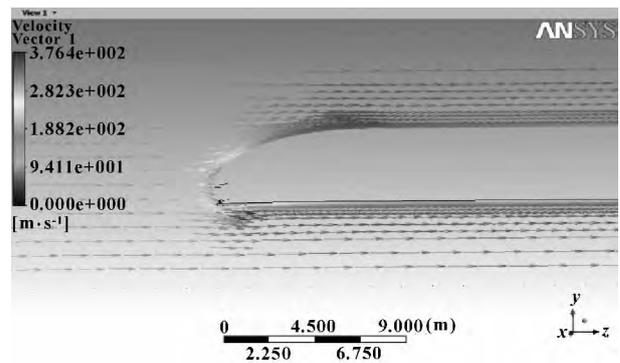


图 5 车头外流场速度流线图

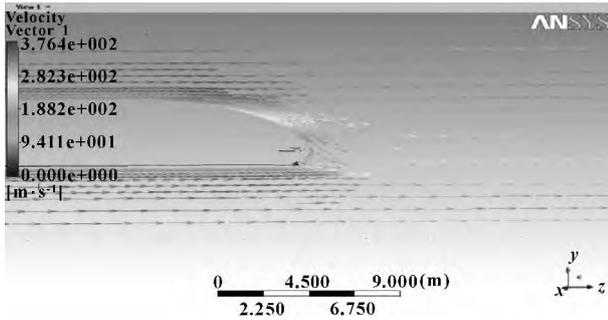


图 6 车尾外流场速度流线图

### 3 优化设计分析

#### 3.1 系统物理模型影响分析

分析图 3、4，发现车身过渡的曲率对列车的空气动力性能影响较大。对列车物理模型参数进行修改，设计 5 组不同车身过渡曲率，并分析相应空气动力性能，获得列车气动阻力和气动升力随车身过渡曲率的变化规律（图 7），从而选择比较合理的列车模型。

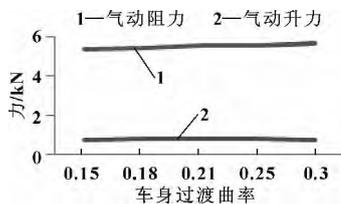


图 7 车身过渡曲率对气动阻力和升力的变化规律

从图 7 可知，随着车身过渡曲率的增大，列车的气动阻力略有增大，列车气动升力影响不大。可见在选择列车模型的时候应该适当考虑其对气动阻力的影响。为了减少列车的气动阻力，选择车身过渡曲率 0.15 的列车模型。

#### 3.2 阻塞比影响分析

阻塞比是指列车截面积与管道截面积的比值。前期初步计算流场时，假设的阻塞比为 0.1。通过调整管道的直径可以改变阻塞比的大小。同样选取 5 组不同的阻塞比，对列车进行空气动力性能分析，得出列车气动阻力和气动升力随阻塞比的变化规律，从而选择比较合适的阻塞比。

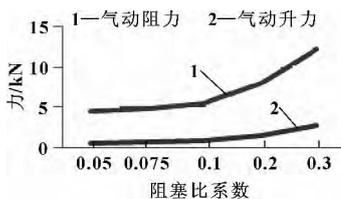


图 8 气动阻力和气动升力随阻塞比的变化规律

从图 8 可以看出，当阻塞比系数小于 0.1 时，列车的气动阻力和气动升力随着阻塞比系数的增大变化比较平缓；当阻塞比系数大于 0.1 时，列车气动阻力和气动升力随着阻塞比系数的增大而迅速增大。综合

考虑到系统设计的经济性和适用性，选择真空管道运输系统的阻塞比系数为 0.1。

#### 3.3 速度、管内气压影响分析

采用 ANSYS Workbench 平台，进行真空管道运输系统速度、管内气压的影响分析。考虑到计算机硬件水平，在列车速度 600 ~ 1 000 km/h，真空管道内气压为 1 013.5 ~ 3 039.5 Pa 范围内，通过计算机自动选取 10 组样本进行计算，表 1 是 10 组数据的分析结果。

表 1 10 组随机样本的速度、气压与阻力分析结果

序号	气压/Pa	速度/(m·s <sup>-1</sup> )	气动阻力/N	气动升力/N
1	1 925.2	216.7	5 054.8	784.91
2	2 533.2	172.26	4 184.3	632.45
3	1 114.6	194.48	2 454.5	355.83
4	2 330.5	238.92	7 288	1 109
5	1 317.3	227.81	3 894.6	572.6
6	2 938.5	250.03	9 920.1	1 534.2
7	2 127.9	272.25	8 626	1 320.7
8	2 735.8	205.59	6 345.5	975.58
9	1 722.6	183.37	3 291.4	493.69
10	1 519.9	261.14	5 791.5	868.79

选择非参数回归模型分析管道内气压、列车速度对列车气动阻力的影响规律（图 9、10）。

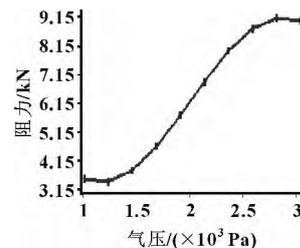


图 9 列车气动阻力随管道内气压变化规律

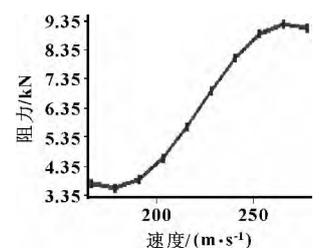


图 10 列车气动阻力随列车速度变化规律

从图 9 可以看到，列车气动阻力与管道内气压呈两次方关系，随着管道内气压的增大，即管道内空气变得密集，列车气动阻力迅速变大。从图 10 可知，列车气动阻力与速度也呈两次方关系，随着列车速度的增大，气动阻力迅速变大。这跟实际情况是一致的。

#### 3.4 优化模型及结果

气动阻力是列车行驶过程中最主要的阻力，主要是列车与空气的摩擦和压力差产生的。这个压差的大小又与气动升力有关，气动升力大，压差阻力也就越大。ETT 系统中列车速度和管内真空度将直接影响列车气动阻力和气动升力。借助 Workbench 建立两者共同作用下，速度、真空度、气动阻力三者关系的权衡图（图 11）。

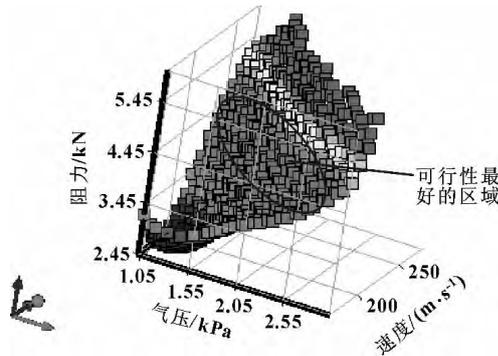


图 11 速度、真空度、气动阻力权衡图

模糊多准则的评价方法是把模糊数学引入到多准则评价方法中。由于实际工程问题的复杂性，使得多场耦合下的真空管道系统中有必要考虑模糊信息，如模糊速度、模糊材料、模糊边界条件、系统本身的模糊性等。在多目标优化过程中，先求出各子目标的约束最优解，再利用这些最优解将各子目标函数模糊化，然后求取交集，便是多目标优化问题的最优解。

通过模糊多准则的评价方法，基于最佳空间填充设计模型和非参数回归模型建立目标函数和设计变量之间的近似关系，以列车速度最大、列车气动阻力最小和气动升力最大为主要目标，速度、管内真空度范围等作为约束条件，建立系统模糊多准则评价数学优化模型。设列车速度和管内真空度为模糊约束，设计变量为列车阻力和气动升力<sup>[6]</sup>。

$$\begin{aligned}
 \text{Find } X &= [x_1, x_2]^T & (6) \\
 \text{Max } f(X) &= \text{velocity}(X) \\
 \text{s t } M_x^l &\leq M(X) \leq M_x^u \\
 T_x^l &\leq T(X) \leq T_x^u \\
 x_i^l &\leq x_i(X) \leq x_i^u \quad i = 1, 2
 \end{aligned}$$

式中： $x_1$  和  $x_2$  为设计变量，分别表示气动阻力和气动升力； $f(X)_{\text{velocity}}$  表示列车速度的目标函数； $M_x^l$  和  $M_x^u$  表示管道真空度的上、下限； $T_x^l$  和  $T_x^u$  表示列车速度的上、下限。波浪号表示变量或运算中含有模糊信息。

利用 Response Surface 以及 Goal Driven Optimization 两个模块作为优化设计工具，选择最佳空间填充设计，因为最佳空间填充设计模型适合于不存在随机误差，但强调控制系统偏差的试验场合。以列车速度最大、列车气动阻力最小和气动升力最大为目标得出三组解，从图中可以看出 candidate A 为最优解。优化结果为管内真空度 1 077.1 Pa，列车运行速度 987.7 km/h，列车的气动阻力 5 302.2 N，气动升力 793.2 N，优化结果如图 12 所示。

	A	B	C	D	E
2	Optimization Study				
3	Objective	No Objective	Maximize	Minimize	No Objective
4	Target Value				
5	Importance	Default	Higher	Higher	Default
6	Candidate Points				
7	Candidate A	1077.1	274.38	5302.2	793.2
8	Candidate B	1336.5	274.82	5772.7	869.38
9	Candidate C	1563.5	271.13	6368.2	963.82

图 12 优化结果

为了验证最优解，将 A 组优化结果重新代入 Fluent 中进行流场计算，得到列车的气动阻力为 5 213.6 N，气动升力为 680.17 N，与优化模型计算相比结果相差不大。可以证明，模型对速度、管内真空度的优化结果是合理的。

#### 4 结论

(1) 利用 Pro/E 对 ETT 系统进行参数化建模，便于多场耦合作用下研究阻塞比及列车形状等系统物理模型参数对列车速度、气动阻力的影响，对快速确定合理的 ETT 系统参数设计方案提高方便。

(2) 基于标准  $k-\varepsilon$  双方程模型仿真计算 ETT 系统内部湍流流场。得出：气动阻力随着流线型车身过渡曲率的增大而增大，经对比分析，流线型车身过渡曲率为 0.15 时，经济性和适用性较好；管道阻塞比对列车阻力的影响不可忽略，阻塞比对列车阻力成线性关系增长。由于列车的截面积变化范围较小，只能增大管道截面来减少遮挡系数，由此又会增加工程成本，进而影响其运营成本，所以要综合考虑两者的关系；列车气动阻力和气动升力都随着列车速度的增大而迅速增大，同样将随管道内气压的增大而迅速增大。

(3) 利用模糊多准则的评价方法，建立系统模糊多准则评价数学优化模型。基于最佳空间填充设计模型和非参数回归模型建立目标函数，计算优化方案为：列车运行速度为 987.7 km/h，管内真空度 1 077.1 Pa，列车的气动阻力 5 213.6 N，气动升力 680.17 N。

#### 参考文献:

- [1] 沈志云. 关于我国发展真空管道高速交通的思考[J]. 西南交通大学学报, 2005, 4; 40(2): 133-137.
- [2] 周晓, 张耀平, 姚应峰. 真空管道中高速列车空气阻力数值仿真[J]. 科学技术与工程, 2008, 8(6): 1626-1628.
- [3] 纪兵兵, 陈金瓶. ANSYS ICEM CFD 网格划分技术实例详解[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012.
- [4] 吴光中, 宋婷婷, 张毅. FLUENT 基础入门与案例精通[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.
- [5] 李明高, 李明. ANSYS 13.0 流场分析技术及应用实例[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [6] 赖一楠, 游斌弟, 宋一新. 复杂机械结构模糊有限元优化[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41(9): 164-168.