

CRH3 型高速列车气动头型优化计算研究

Optimization of the Head Shape of the CRH3 High Speed Train

孙振旭 宋婧婧 安亦然

北京大学工学院, 北京, 100871

摘 要: 本文针对 CRH3 型高速列车的气动外形设计问题, 提出了一套高效的头型气动力优化方法。使用 NS 方程进行流场求解, 结合遗传优化算法和任意网格变形技术, 避免了流场计算时几何变形和网格剖分的庞大时间开销, 提高了优化计算的效率。通过对设计空间中的设计点进行统计分析, 研究了优化设计变量与优化目标之间的相关性, 分析出了影响优化目标的几个关键变量, 并采用 Kriging 算法对关键设计变量与优化目标进行了响应面分析, 得到了关键设计变量与优化目标之间的非线性关系。最后, 通过优化头型与原始头型的气动性能比较, 对 CRH3 型高速列车原始头型的气动稳定型进行了评估。

关键词: 优化, 任意网格变形, 响应面分析, Kriging 算法、modeFRONTIER

Abstract: Aiming at optimizing the head shape of the CRH3 high speed train, an efficient optimization approach is proposed. The CFD analysis by solving Navier-Stokes equations is coupled with optimization calculation based on the multi-objective genetic algorithm, meanwhile the arbitrary shape deformation technique (ASD) is also introduced into the design flow, which greatly shortens the time consumption for geometry regeneration and flow field remeshing. As a result, the efficiency of the optimization calculation is highly improved. Statistical analysis is done to the designs in the design space, and the correlation between the design variables and the objective is studied to find out the key variables that most affect the objective. Response surface analysis is also performed to get the nonlinear relationship between the key design variables and the objective with the Kriging algorithm. Finally, after the optimization, an aerodynamic performance comparison between the optimal shape and the original shape reveals that the original shape of CRH3 high speed train owns a very stable aerodynamic performance and can be trustingly used in industry.

Key words: optimization, arbitrary shape deformation, response surface analysis, Kriging algorithm, modeFRONTIER

1 前言

高速铁路的发展对我国国民经济发展和社会进步起着至关重要的作用。国际上以日本和欧洲为代表的发达国家在高速铁路领域已经进行了大量的科学研究，积累了丰富的知识和经验，在这些工作的基础上不断开发出新型的高速列车，且速度越来越快。高速列车运行时的安全性、舒适性、低能耗以及对周围环境影响等都和高速列车的空气动力学性能紧密联系在一起。列车的空气动力性能与列车外形有着密切的关系，外形的流线型直接影响着列车空气动力性能^[1-3]。头、尾车的阻力系数、升力系数的绝对值深受流线型头部的影响。而头车、尾车的阻力系数越小，同样编组情况下的列车总阻力就越小，能耗也越少。总之，应尽量使得列车的空气阻力变小。新型高速列车的研发必须按照这一原则来进行气动力外形优化。

现代工程设计对象要求优化的因素是多方面的，经常又是彼此矛盾的^[4]；而优化又必须在诸多现实可行的条件，如体积不得大于X、重量不得超过Y等的约束下进行。这样一类数学问题必然需要分解成比较单纯的小型数学问题，并加以组合以达到最后目标。计算这类具有不同约束的数学问题必须要对各个子问题的组织和协调进行深入研究。因而，对于这样的问题必须以‘系统工程’的角度来审视，来优化。

国内外研究高速列车外形优化主要有两类方法：实验方法和数值模拟方法。实验方法以风洞实验为主，其他还有水洞实验方法、电模拟实验方法、实车实验方法等。目前，国内外主要还是采用实验研究方法。随着计算机技术的飞速发展，数值模拟已成为可能：实验研究存在着的耗资大、费时较多，由实验设备引起的误差等诸多问题，在数值模拟中都可以克服。在短时间内，耗资很低的情况下，可以对大量工况进行计算分析。当前一般的数值模拟研究程序是：先对几种特定工况进行实验分析，根据实验结果来检验计算方法和计算程序的正确性，然后利用数值模拟进行大量工况计算，对计算结果进行有效分析，找出规律。最后再从中选定几个方案进行风洞实验，与计算结果进行比较分析，得出一般性的结论。

从本质上讲上述方法属于优选方法，且过多地依赖于工程经验。即使计算了许多工况并找到了一些规律，但这些规律也只是单个设计变量与优化目标之间的规律，并不能得到多个设计变量与优化目标的非线性关系。为了摆脱这一方法的局限性而得到真正的最优化外形设计，必须采用直接优化方法。

直接优化设计方法是在满足一定约束的条件下，用数学方法对某些设计目标寻求尽可能最大或最小（如翼型升阻比的最大化、机车阻力的最小化等），从而将外形设计问题转化为一个约束优化数学问题。根据优化算法的不同，直接优化设计方法可以概括为局部方法和全局方法两类。梯度法为局部方法的代表^[5-6]，它是采用目标函数的梯度作为方向的一种搜索算法，但这种方法只能保证得到一个局部最优解。全局方法的优点是可能得到全局最优解，不受计算目标对设计变量灵敏度的限

制。但这类方法属于随机搜索方法，需要多次进行几何变形、网格重构和流场计算，因此计算效率相对较低^[7]。

通常情况下流场的优化受到计算条件的制约，难以应用于实际工程问题。而高速列车头型优化问题是一种三维流场变几何优化问题，在采用全局算法优化时计算效率较低。本文利用各类可解‘子问题’的现成软件加以组织结合而实现了全局优化的设计方法。该软件概念清晰、操作简易、效率较高，克服了几何变形和网格重构带来的困难，并可以在设计空间中搜索到全局最优解。

2 优化思路

流场中的三维几何优化主要存在三个挑战：（1）反复求解NS方程的效率；（2）数学上准确描述任意三维几何模型的能力；（3）在几何变形后保持或者获得新的流场合适网格的能力。针对第一点，为了提高CFD计算的效率，应该保证每次求解NS方程时给定一个比较合理的初始值，以减少计算迭代的步数，使计算更快地收敛；为了实现第二点，人们寻找一个通用的方法，先将原始几何参数化^[8]。对第三个挑战，有两种不同的方法来完成。第一种方法就是在每次几何变形后重构网格。这对大多数工程问题来说基本上不现实，因为它取决于相应的网格自动生成是否可行，但后者的研究在目前看来远远没有达到成熟的地步。第二种方法就是在优化过程中当几何变形的时候同时对原来的网格进行变形，并在变形的过程中保持网格质量^[9]。传统的优化方法往往采用第一种方法，大量计算时间应用于几何变形和网格重构上，这大大降低了优化的效率。本文在优化过程中采用了第二类方法，即使用任意几何变形（Arbitrary Shape Deformation, ASD）技术。ASD技术基于计算模型建立新的控制面，通过移动控制面的控制点以直接改变计算网格，达到网格变形的目的。这省去了几何重构的过程，提高了优化的效率。

本文采用多种优化软件耦合 CFD 计算软件 CCM+进行高速列车气动头型优化。优化软件包括SCULPTOR 和 modeFRONTIER 两种。SCULPTOR 虽然拥有新颖的 ASD 技术，但是因为其本身所带的算法大多为基于梯度的优化算法（如最速下降法、牛顿法、广义既约梯度法、序列二次规划法等），优化时往往会局限于局部最优点，这大大限制了优化的精度。而 modeFRONTIER 是一种比较成熟的非线性多目标优化集成平台，包含许多成熟的优化算法，从实验设计算法到优化算法（如 MOGA-II, MOSA 等），可以比较准确地捕捉设计空间中的最优解。本文取长补短，在 modeFRONTIER 中耦合了 SCULPTOR 中的网格变形技术，同时耦合 CCM+用来对每一个设计进行 CFD 计算，得到相应的气动阻力，以完成优化目标的求解。为了提高优化效率，节省流场计算时间，首先对高速列车原始头型进行了气动力计算并保存，后续网格变形后的设计求解均以此为初值进行续算，直至收敛。

本文对 CRH3 高速列车头部外形进行优化，以列车受到的阻力作为优化目标。针对高速列车头部外形的设计参数，优化时采用以下几个优化变量，具体包括：鼻端高度（Nose Height），鼻端长度（Nose Forward），鼻端厚度（Nose Thickness），以及司机室上壁面的高度（Nose Top Channel）。这四个变

量可以大致刻画出高速列车头部流线型,通过对这四个变量的调整即可以修正头部流线型。原始头型对应各个设计变量值均为零,当 **NoseForward** 变量值为负时表示鼻锥向前拉伸, **NoseThickness** 变量值为负时表示鼻锥变薄, **NoseHeight** 为负时表示鼻锥向地面移动, **NoseTopChannel** 为负时表示司机室上壁面下移,所有变量值为正时变化方向相反。同时因高速列车头部长细比不能太长,机车内零部件便于安装、司机视角不受影响、司机室空间适当等诸多因素,这四个外形设计参数又受到一定的约束,即需要限定它们的变化范围。图 1-图 5 为 CRH3 型高速列车基础头型及各个变量发生较大变化后的头型。

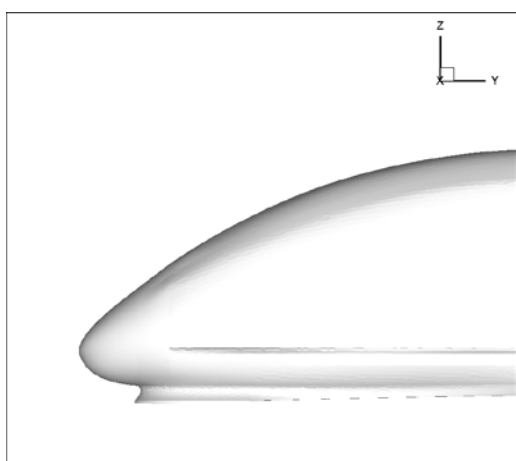


图 1 Base line

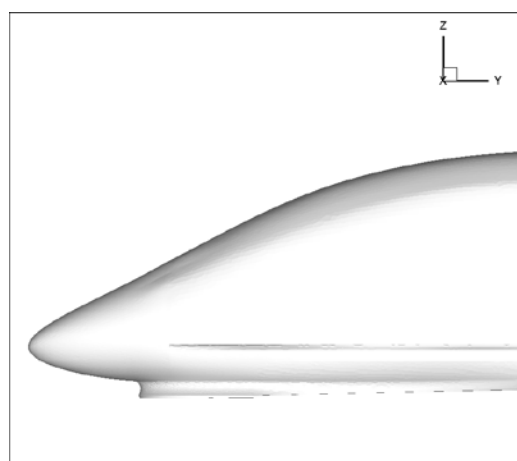


图 2 Nose Forward

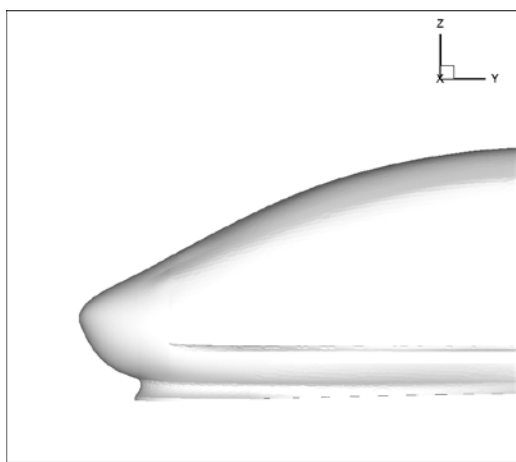


图 3 Nose Height

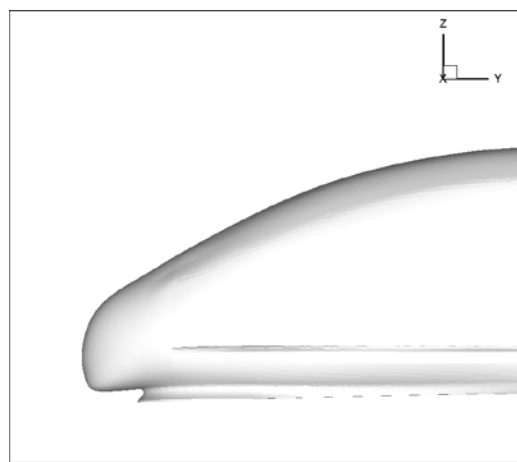


图 4 Nose Thickness

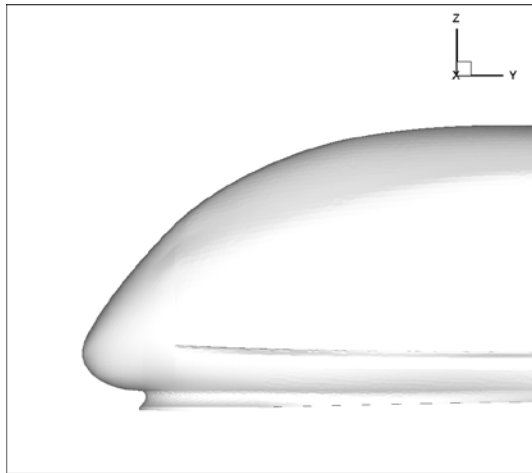


图 5 Nose Top Channel

为了能够捕捉优化目标与设计变量之间的非线性关系，首先需要在设计空间中生成初始实验设计点，优化以这些初始设计点为基础进行寻优。初始设计点分布非常重要，如果分布比较合理的话，它可以非常好的表达设计空间信息并简化优化计算步数。本文采用了Sobol方法^[10-11]，这是一种伪随机算法，相对于随机算法其生成的初始设计点在设计空间中分布更加均匀。优化算法采用了MOGA-II算法，该算法继承了遗传算法的随机性和并行性。为了提高计算精度，在优化计算完毕后，基于现有计算设计点进行响应面分析^[12]，对设计空间函数关系进行了拟合，以获得最优解。整体设计流程如图 6 所示：

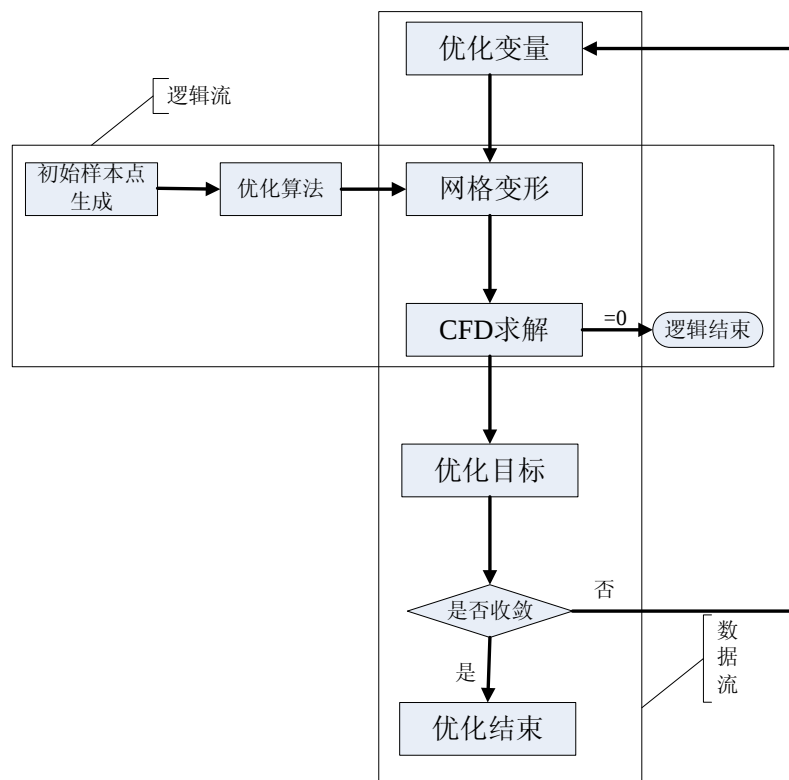


图 6 优化整体设计流程

3 结果分析

3.1 计算网格及条件

为了简化计算，本文仅针对 CRH3 型高速列车的头车流线型进行分析。列车头部鼻锥处为流动的滞止区域，各物理量在该处变化梯度较大，故在此处进行了局部加密，其他像头车车身位置则采用了较疏网格，在列车壁面上均采用边界层网格以捕捉流动在近壁面的行为，整体计算域网格量约为 73 万，列车头部初始计算网格如图 7 所示：

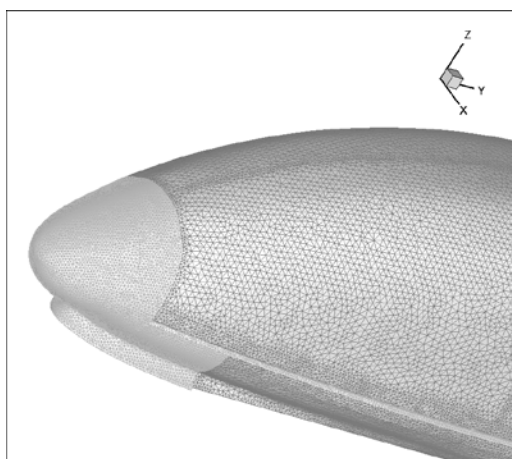


图 7 CRH3 型列车头部网格

计算来流速度为 83.33m/s ，地面设为运动壁面，移动速度与来流速度相同。计算域出口设定为压力出口条件，环境压强规定为 1 个标准大气压。原始车型在迭代 9000 步之后计算收敛。以原始车型的收敛解为基础进行优化计算。

3.2 优化分析

本文实验设计初始采样点设定为 16 个，因为 MOGA-II 计算进行六代遗传，故在完成 96 个设计后整体优化计算完毕。图 8 所示为在优化时每次设计输出的阻力整体变化曲线：

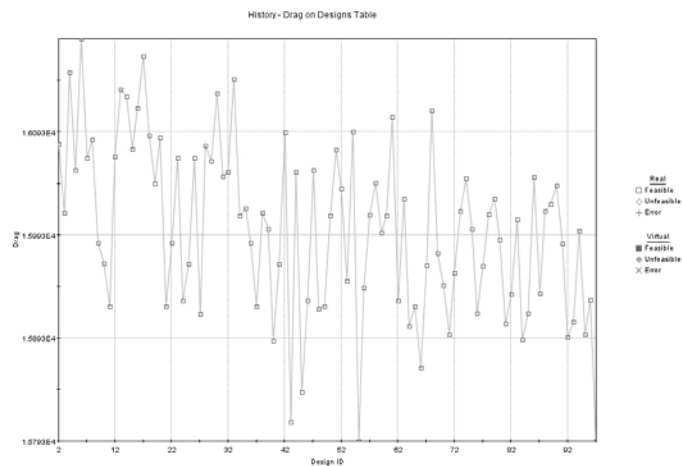


图 8 阻力历史曲线

可以看出,通过优化算法在设计空间中的采样,每次设计得到的阻力值整体呈变小的趋势,CRH3 型车的头型逐渐向阻力最优化方向改进。

通过对优化过程中的优化设计变量值与目标函数值进行统计分析可以得到图 9:

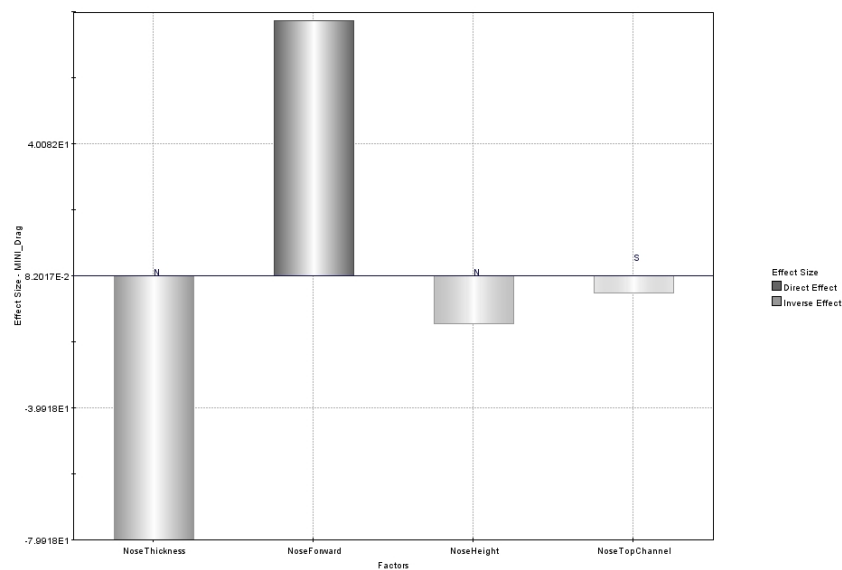


图 9 设计变量与优化目标相关性图

从图中可以看出, **NoseForward** 变量在一定范围内与阻力具有正相关性,即当鼻锥变短时阻力增大,鼻锥变长时阻力减小。其他三个变量在一定范围内与阻力具有负相关性,如鼻锥变薄时阻力增大,鼻锥变厚时阻力减小,其他类似。从相关性量级上可以看出,在本优化过程中目标函数对两个优化设计变量比较敏感,即鼻锥厚度与鼻锥的长度。相反,其他两个设计变量如鼻锥高度和司机室上壁面高度对阻力的影响并不明显。

为了进一步探讨优化设计变量与优化目标之间的关系,本文在上述分析基础上选择**NoseForward**

和NoseThickness这两个比较敏感的变量与阻力进行响应面分析。这里采用了Kriging方法^[15-16]拟合出的三维曲面和二维面如图 10 和图 11 所示：

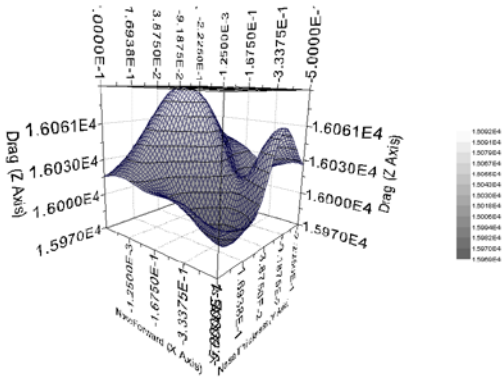


图 10 三维 RS

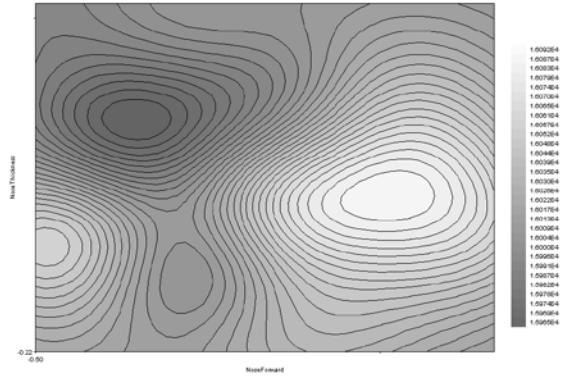


图 11 二维 RS

可以看出，这两个优化设计变量与目标之间并非纯粹的线性关系，在设计空间内如果鼻锥过长或者过厚，均会使得阻力上升，确切的关系如图 12-图 13 所示：

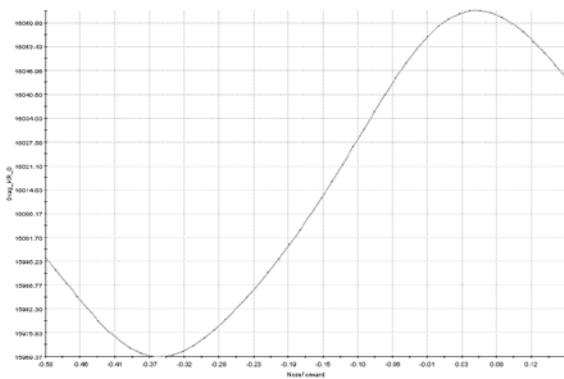


图 12 鼻锥长度与阻力关系曲线

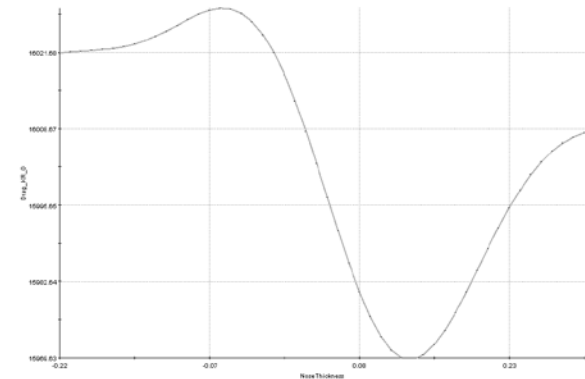


图 13 鼻锥厚度与阻力关系曲线

以上两图给出了在设计空间中优化设计变量与优化目标之间的非线性关系，这在一般的优选做法中不可能得到。同时可以看出，如果单纯以这两个变量作为优化设计变量，得到的阻力值比采用四个变量时的最优阻力值要高，这说明，虽然后两个设计变量对优化目标不敏感，但是如果配合前两个变量一起优化可以对优化车型做进一步改进。

3.3 气动分析

在本次优化中获得阻力最优解为 $D = 1.5793e4N$ ，而初始头型阻力值 $D_0 = 1.6091e4N$ ，阻力降低约 1.85%。另一方面，优化阻力时并不能以恶化高速列车在气动升力方面的性能作为代价。原始头型升力值为 $L_0 = -5128N$ ，而优化后的头型其升力值为 $L = -6022N$ 。可以发现，优化后的头型

相对于原始头型其向下的压力值变大，这提高了高速列车行驶时的稳定性。最优解对应的各个设计变量值为：NoseForward 为-0.465，NoseHeight 为 0.115，NoseThickness 为 0.245，NoseTopChannel 为 0.64。原始头型和优化头型对比如图 14-图 15 所示：

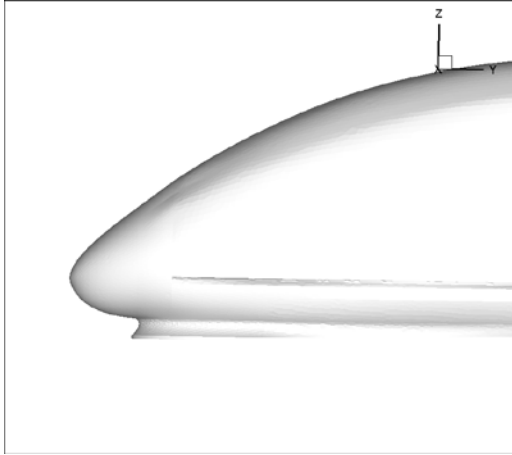


图 14 原始头型

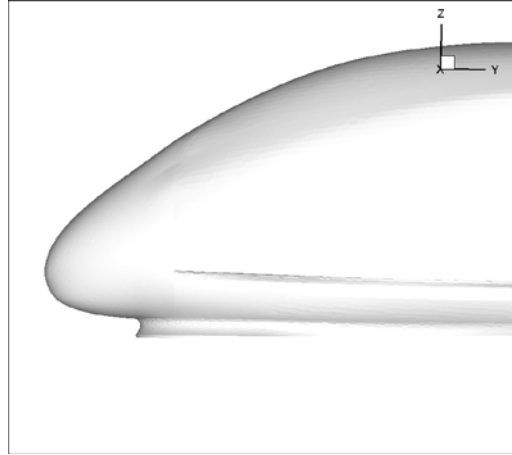


图 15 优化头型

与原始头型相比，优化后的头型鼻锥长度有较大伸长，整体鼻锥端厚度变大，鼻锥端高度略有提高，且在司机室上部壁面有较大幅度抬升。

在列车阻力计算中影响最大的是压差阻力，列车头型的改变将直接影响沿列车头部壁面的压力分布，进而影响阻力变化。图 16-图 17 给出了两个头型头部壁面的正压力分布对比：

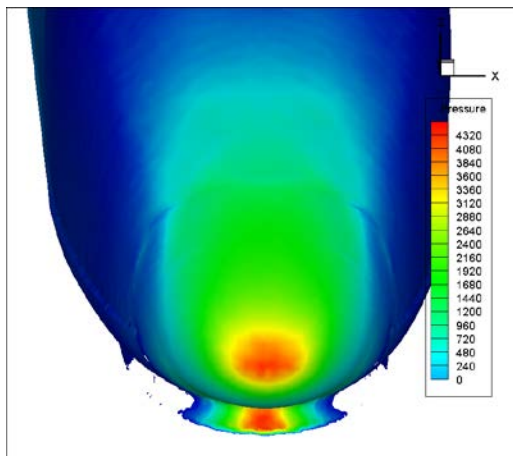


图 16 原始头型正压云图

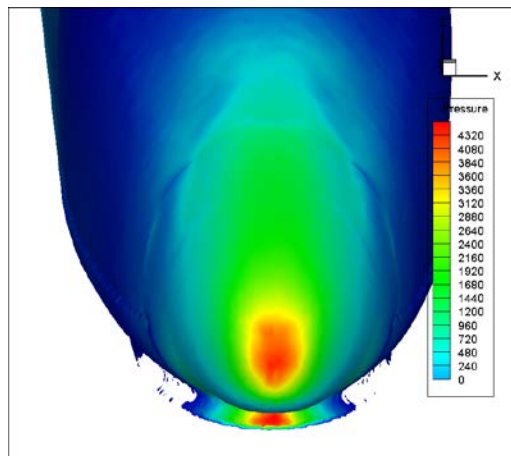


图 17 优化头型正压云图

鼻锥顶点及导流罩前缘为滞止点，速度最低，为压力最大区域。当流动绕过鼻锥前缘后流动区域迅速增大，流速增加而压力迅速降低。头部的正压是高速列车阻力的主要来源。从上图可以看出，最大正压力分布区在鼻锥尖端发生了变化。原始头型为水平方向分布占优，而优化头型为垂直方向

占优，且两者作用面积相当。查看次高压分布区间（压力分布为 1680Pa~3360Pa 之间）可以发现，原始头型该区域分布基本上占据了整个列车头部大部分区域，而优化头型则仅在对称线区域附近存在。

图 18-图 19 给出两个头型在列车中心纵剖面上的压力分布云图对比：

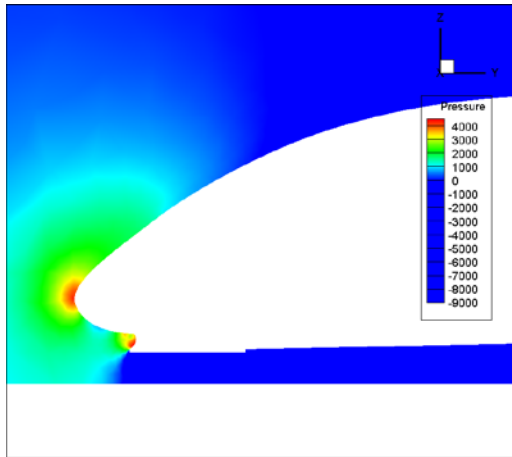


图 18 原始头型中心纵剖面压力云图

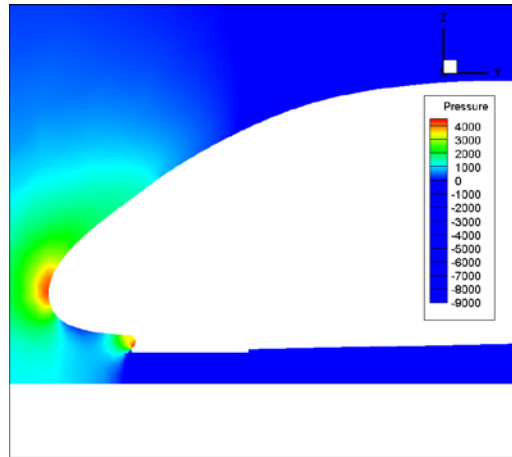


图 19 优化头型中心纵剖面压力云图

可以看出，在鼻锥下端位置，优化头型相对于原始头型存在一个比较大的负压区，在 z 向表现为产生一个较大的下压力，在 y 向表现为削弱了运行方向的阻力。同时在鼻锥下部与导流罩结合的凹面位置，优化头型相对于原始头型也存在一个较小的正压区，这也使得优化头型的阻力较原始头型的小。

4 结论

现代工程设计对象因为其优化因素的多面性与彼此可能的矛盾性，要求在优化时必须以‘系统工程’的角度来进行，同时兼顾到各个子问题的分解、组织和协调。本文遵循这一原则，采用 MOGA-II 优化算法对 CRH3 型高速列车的头型进行了气动力优化，克服了传统高速列车外形设计方法囿于优选而不能准确把握外形设计参数与优化目标关系的局限性。

本文的优化设计方法采用了全局的随机搜索算法，可以在整个设计空间内获得外形设计参数与优化目标之间的关系，因而可以得到全局最优解。但是，传统的优化方法在计算复杂几何外形时又因每次迭代时重构网格而带来了大量的计算消耗，降低了优化效率。这也是优化方法在列车气动外形设计时没有普及起来的一个重大原因。本文在优化设计时耦合了 ASD 技术，直接对计算网格进行变形，避免了每次迭代时几何变形和重新剖分网格的困难，大大提高了优化设计方法的效率。通过对 CRH3 型高速列车头型气动特性优化计算，验证了本优化方法的可行性和高效性。

计算结果表明, 在外形设计参数 **NoseForward** 为 -0.465, **NoseHeight** 为 0.115, **NoseThickness** 为 0.245, **NoseTopChannel** 为 0.64 时, 高速列车的阻力获得最大降低幅度, 其阻力相对于原头型降低了 1.85%。通过对外形设计参数与优化目标之间的相关性分析, 分析出鼻锥长度和厚度是对阻力最敏感的两个参量。通过对这两个参量与优化目标之间的响应面分析, 得到了在整个设计空间中三者的关系曲面, 并分别获得了外形设计参数与优化目标之间的非线性曲线。

另外, 通过观察整个设计空间中的阻力特性可以发现, 阻力改变幅值均变化很小。这说明, CRH3 的原设计头型在气动性能上具有很强的鲁棒性, 其气动阻力特性在优化设计参数的一定变化幅度内并不敏感, 这也是一个成熟的设计头型应该具有的基本性能。

5 参考文献

- [1] BAKER C, The flow around high speed trains [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2010, 98(6-7):277-298
- [2] RAGHUNATHAN R S, Kim H D, SETOGUCHI, Aerodynamics of high-speed railway train[J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2002, 38(6-7):469-514
- [3] BROCKIE N J W, BAKER C, The aerodynamic drag of high speed trains[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1990, 34(3):273-290
- [4] MIETTINEN K, Nonlinear Multi-objective Optimization[M]. USA Norwell Massachusetts: Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [5] PANDYA M J, BAYSAL O. Gradient-based aerodynamic shape optimization using alternating direction implicit method[J]. *Journal of Aircraft*, 1997, 34(3):346-352
- [6] NEWMAN J C, TAYLOR A C, BARNWELL R W, et al. Overview of sensitivity analysis and shape optimization for complex aerodynamic configurations[J]. *Journal of Aircraft*, 1999, 36(1):87-96
- [7] Deb K, Multi-objective Genetic Algorithms: Problem Difficulties and Construction of Test Problems[J]. *Evolutionary Computation*, 1999, 7:205-230
- [8] ALEXA M, BEHR J, COHEN-OR D, et al. Computing and Rendering Point Set Surfaces[J]. *Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2003, 9(1):3-15
- [9] KOBELT L P, BAREUTHER T, SEIDEL H P, Multi-resolution Shape Deformations for Meshes with Dynamic Vertex Connectivity[J]. *Computer Graphics Forum*, 2000, 19(3):249-259
- [10] SOBOL I M, SHUKMAN B V. Random and quasi-random sequences: Numerical estimates of uniformity of distribution[J]. *Mathematical and Computer Modelling*, 1993, 18(8):39-45
- [11] SOBOL I M. Uniformly distributed sequences with an additional uniform property[J]. *USSR Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 1976, 16(5):236-242
- [12] GOEL T, VAIDYANATHAN R, HAFTKA R T, et al. Response surface approximation of Pareto optimal front in multi-objective optimization[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2007, 196(4-6):879-893
- [13] ELAOU D S, LOUKIL T, TEGHEM J, The Pareto fitness genetic algorithm: Test function study[J]. *European Journal of Operational Research*, 2007, 177(3):1703-1719
- [14] JONES W P, LAUNDER B E, The prediction of laminarization with a two-equation model of turbulence[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1972, 15(2):301-314.

- [15] SAKATA S, ASHIDA F, ZAKO M, Hybrid approximation algorithm with Kriging and quadratic polynomial-based approach for approximate optimization[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2006, 70(6):631-654
- [16] SAKATA S, ASHIDA F, ZAKO M, On applying Kriging-based approximate optimization to inaccurate data[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2007, 196(13-16):2055-2069