Applied Physics 应用物理, 2024, 14(6), 470-480
Published Online June 2024 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/app
https://doi.org/10.12677/app.2024.146052

Hans汉斯

基于高低阶多项式的风洞收缩段智能设计方法

朱喻成，张惠林，赵　峰，李松锜*

比亚迪汽车工业有限公司，广东 深圳

收稿日期：2024年5月20日；录用日期：2024年6月20日；发布日期：2024年6月30日

摘　要

汽车风洞的收缩段对于风洞内的流场品质有着重要影响。在计算机技术快速发展的背景下，高精度数值仿真和智能优化算法的结合成为优化设计的趋势。针对收缩段气动轮廓的设计问题，本文创新地提出了一种基于高低阶多项式的智能设计方法，该方法结合高精度仿真与智能优化技术，可以显著提升收缩段的气动性能。以典型汽车风洞收缩段设计为例，该方法可以打破在传统设计方法的基础上实现更进一步的性能提升，实现更高的流场均匀性和平直度。该方法可以推广到车辆空气动力学优化等重点工程领域，为车辆低风阻开发、能源管理等应用场景提供有效的优化设计方法。

关键词

风洞，人工智能，优化，空气动力学

Intelligent Wind Tunnel Contraction Design Based on Coupled High and Low Order Polynomials

Yucheng Zhu, Huilin Zhang, Feng Zhao, Songqi Li*

BYD Auto Industry Co., Ltd., Shenzhen Guangdong

Received: May 20th, 2024; accepted: Jun. 20th, 2024; published: Jun. 30th, 2024

Abstract

In the context of rapidly advancing computer technology, synergizing high-fidelity numerical simulations and intelligent optimization algorithms holds significance for the design of the wind

*通讯作者。

文章引用: 朱喻成, 张惠林, 赵峰, 李松锜. 基于高低阶多项式的风洞收缩段智能设计方法[J]. 应用物理, 2024, 14(6): 470-480. DOI: 10.12677/app.2024.146052

tunnel contraction section, which plays a crucial role in flow field quality. This paper introduces an innovative, intelligent design method, which integrates high- and low-order polynomial profiles. With numerical simulations and intelligent optimization, this novel method can enhance the aerodynamic performance of the contraction geometry. As demonstrated with a standard automotive wind tunnel design, this method surpasses traditional approaches, enhancing flow uniformity and straightness. This technique can be extended to key engineering problems such as vehicle aerodynamics optimization, facilitating effective design strategies for low drag development and energy-efficient management in automotive applications.

Keywords

Wind Tunnel, Artificial Intelligence, Optimization, Aerodynamics

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 介绍

收缩段是风洞的重要组成部分[1] [2]。收缩段利用收缩的型面使得风洞内的气流在通过收缩段时逐渐加速，以达到测试所需的风速。同时，收缩型面会抑制气流中的湍流和涡旋，使得气流在出口处变得更加均匀和稳定。由于收缩段直接影响了风洞内的工作流场的均匀、平直，其空气动力学设计成为风洞系统设计的关键一环[3]。

风洞收缩段的设计主要取决于收缩段长度、收缩比和气动轮廓。收缩段长度和收缩比一般由风洞总体设计方案确定，兼顾性能和经济性。如果收缩段长度过长，收缩比过大，会导致风洞体积增加，造成造价和施工难度剧增，特别是大型低速风洞，例如汽车风洞和大型航空风洞。因此，收缩段设计的主要挑战是在给定的进、出口约束条件下对其气动轮廓进行合理设计。高效的收缩段气动轮廓设计可以保障流场品质，同时兼顾建设成本，减小施工难度。若收缩段设计不当，收缩段内的气流可能存在逆压梯度，从而导致边界层分离，降低流场的流动均匀性和稳定性，对风洞流场品质和风洞测试的准确性都产生较大影响[4]。

目前，常用的收缩段气动轮廓设计方法包括维氏曲线，五次方曲线和双三次曲线[5]。国内外对风洞收缩段的优化主要是设计新型收缩曲线和改进现有曲线。随着计算流体力学的发展，数值仿真技术能够对给定的收缩段气动轮廓进行快速测试，并利用计算结果进行迭代优化。这使得风洞收缩的设计展现出更强大的灵活性[6]。另一方面，优化技术的快速发展允许研究人员设计更为复杂的气动轮廓设计方案。在人工智能快速发展的大背景下，各类智能优化算法的出现，可以实现有限时间内在高维度、高难度的参数空间内的高效、快速寻优。打破传统方法的设计边界，提升优化效果和优化效率[7]。

本文结合空气动力学－气动声学风洞的空气动力学设计，以高精度数值仿真作为基础，结合先进的智能优化算法，提出了一种基于高低阶多项式的风洞收缩段智能设计方法。该方法拓宽了传统收缩段设计方法的边界，通过优化上、下游多项式的阶次，以及连接点的位置，可以实现同等约束条件下收缩段气动性能的提升。研究结果证明了结合人工智能和高精度数值仿真进行空气动力学开发的技术方案可行性，类似的方法也可以推广到车辆空气动力学、气动声学的优化问题中，为车辆工程中的空气动力学优化问题提供高效便捷的解决方案。

2. 基于高低阶多项式的风洞收缩段设计方法

以汽车风洞为例，主要组成如图 1 所示，包括稳定段、收缩段、试验段、扩散段、拐角段、风机段等[8]。收缩段气动轮廓相关参数如图 2 所示。定义原点 O 位于收缩段入口点。收缩段型线中心线沿流向方向为 x 轴，竖直方向为 y 轴，R_1、R_2 分别为收缩段入口、出口处气动轮廓与中心线间的距离。L 为收缩段的长度，h 为距入口 x 处收缩型面与中心线间的距离。

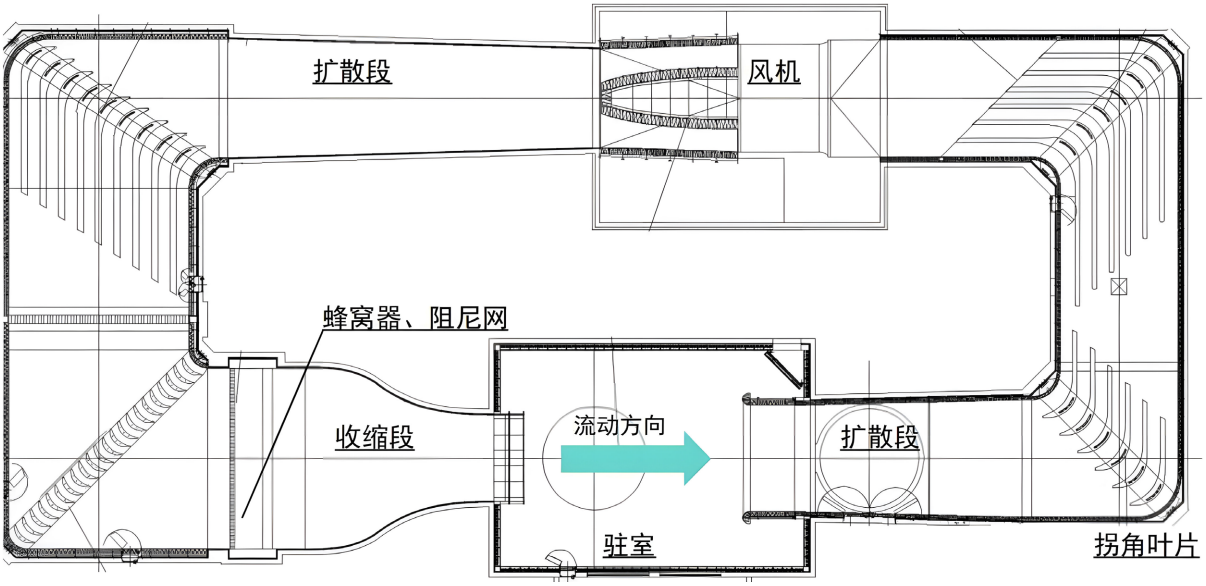

Figure 1. Schematic of an automotive wind tunnel
图 1. 汽车风洞示意图

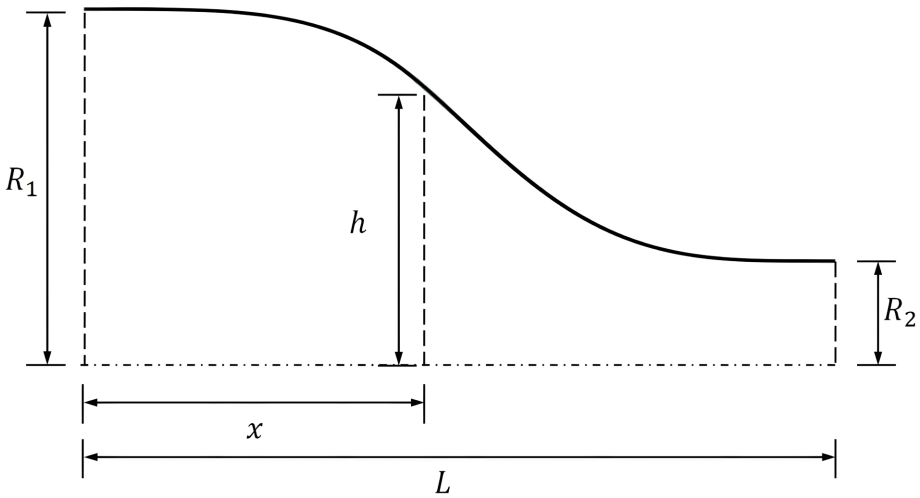

Figure 2. Parameters for contraction aerodynamic design
图 2. 收缩段气动轮廓相关参数示意图

2.1. 典型风洞收缩曲线的数学模型

作为对照，本文研究了三种常用的收缩曲线[9]，其型线 h 表达式如下所示：

1) 维氏曲线

$$h/R_2 = \frac{1}{\sqrt{1-\left[1-\left(\frac{R_2}{R_1}\right)^2\right]\frac{\left(1-(x/L)^2\right)^2}{\left(1+\frac{1}{3}(x/L)^2\right)^3}}} \tag{1}$$

2) 五次曲线

$$\eta = -10(x/L)^4 + 15(x/L)^4 - 6(x/L)^5 \tag{2}$$

$$h = R_1\left(\eta\left(1-R_2/R_1\right)+1\right) \tag{3}$$

3) 双三次曲线

$$\frac{h-R_2}{R_1-R_2} = \begin{cases} 1-\frac{1}{x_m^2}(x/L)^3, x/L < x_m \\ \frac{1}{1-x_m^2}\left[1-(x/L)^3\right], x/L \geq x_m. \end{cases} \tag{4}$$

其中 x_m 为两条三次曲线连接点的横坐标相对于收缩段长度的流向位置。

当 $x_m = 0.5$ 时，三种收缩段曲线比较如图 3 所示。可以看到维氏曲线在入口处收缩最快，而出口处最为平缓。双三次曲线和五次方曲线在入口处收缩都较为平缓，相比之下双三次方曲线在中间部位收缩较快，且在出口处更为平缓。汽车风洞的设计需求下，三种曲线的空气动力学特性将在后续章节进行详细讨论比较。

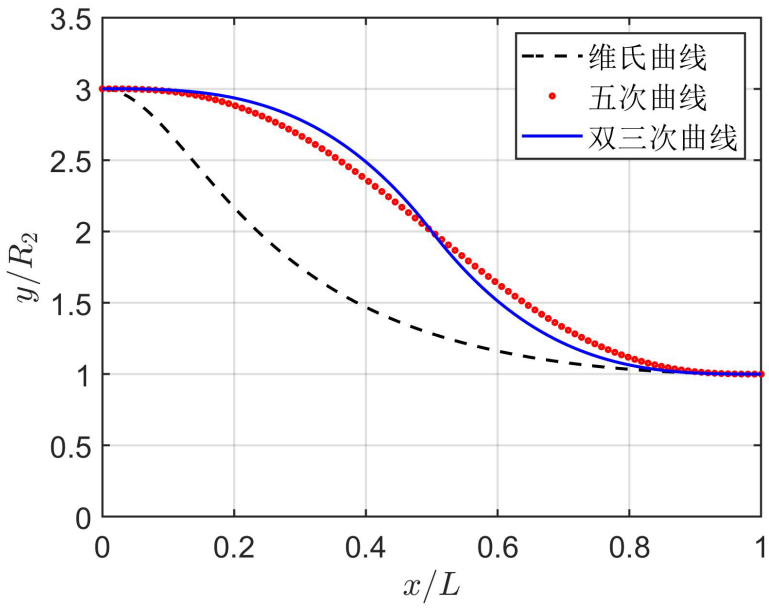

Figure 3. Comparison of three typical aerodynamic design of wind tunnel contraction. The mathching point of third-order curve is at $x_m/L = 0.5$

图 3. 三种典型的收缩段气动轮廓比较。其中双三次曲线的连接点位于 $x_m/L = 0.5$ 处

2.2. 基于高－低阶多项式的风洞收缩曲线的数学模型

在传统气动轮廓设计方案的基础上，本文提出一种基于高－低阶多项式的风洞收缩段曲线的设计方

法。具体而言，收缩段曲线 $h(x)$ 由下游处的高阶多项式(m 阶)和上游处的低阶多项式(n 阶)耦合组成。其中 $3 \le m \le n$。m 和 n 均为整数。高低阶多项式的数学表达式为：

$$h/R_2 = \begin{cases} A_1(x/L)^n + R_1/R_2, 0 \le x/L \le x_m \\ A_2(1-x/L)^m + A_3(1-x/L)^{m-1}, x_m < x/L \le 1 \end{cases} \tag{5}$$

其中 x_m 为高低阶多项式连接点的流向位置。定义矩阵 B、C 如下：

$$B = \begin{bmatrix} 1-R_1/R_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$C = \begin{bmatrix} (x_m)^n & -(1-x_m)^m & -(1-x_m)^{m-1} \\ n(x_m)^{n-1} & m(1-x_m)^{m-1} & (m-1)(1-x_m)^{m-2} \\ n(n-1)(x_m)^{n-2} & m(m-1)(1-x_m)^{m-2} & (m-1)(m-2)(1-x_m)^{m-3} \end{bmatrix}, \tag{6}$$

则常数 A_1，A_2，A_3 的值可以由下列公式给出：

$$A = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{bmatrix} = C^{-1}B.$$

采用该方法，可以保证：

- 收缩段入口处前 $n-1$ 阶导数连续，确保入口处曲线光滑平缓。
- 收缩段出口处前 $m-2$ 阶导数连续，确保出口处曲线光滑平缓。
- 连接点 x_m 处，高低阶多项式曲线及一阶导、二阶导均连续，确保连接点处曲线均匀过渡。

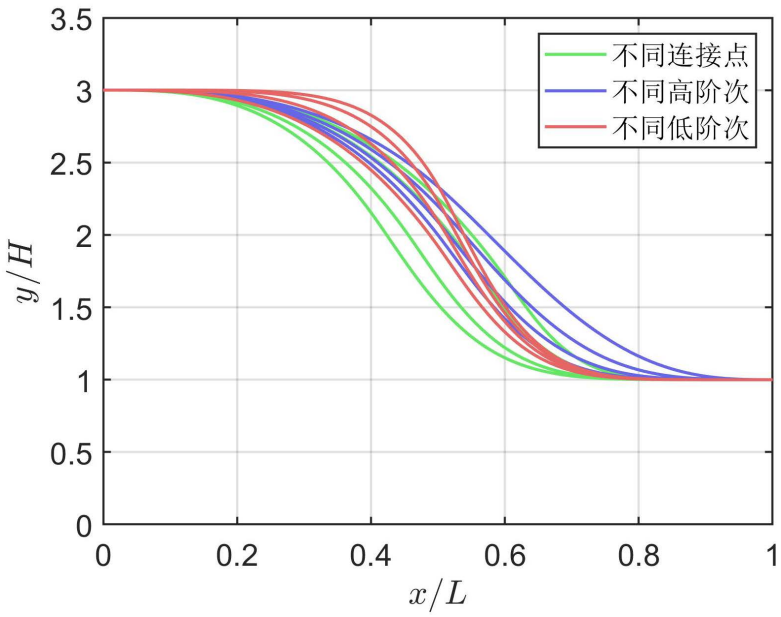

Figure 4. Influence of different high polynomial orders, low polynomial orders, and matching point locations to the contraction design curves
图 4. 不同高阶多项式次数，不同低阶多项式次数，不同连接点位置对收缩段型线形状改变示意图

本方法中高、低阶多项式的阶次 m 和 n，以及连接点的位置 x_m，均可在定义范围内进行调整，从而保证可以在不同的设计约束条件限制下尽可能好的保障型线的气动特性。图 4 展示了不同的连接点、不同高阶次、和不同的低阶次取值对型线整体气动轮廓的影响。可以看到，低阶次主要影响收缩段上游处的平缓程度，阶次越高则上游处的收缩越缓慢，与此同时型线中游的收缩则越剧烈。与之相反，高阶次主要影响收缩段下游的平缓程度，阶次越高则收缩段出口处越平缓，同时导致收缩段中部收缩更剧烈。连接点的作用与双三次曲线中类似，其位置主要影响上下游收缩的比例，连接点位置越接近上游则收缩更靠近上游，反之亦然。这种三个调节参数共同作用的设计方式使得该方法相较于固定气动轮廓、或者仅有单参数可调的传统气动设计方式更为灵活，这种上游－中游－下游的共同调节方式可以有效扩宽设计边界，可以在实际工程设计中的现场条件、整体布局约束下进行灵活调整，实现气动效果的优化。上述高低阶多项式的阶次以及连接点的位置既可以通过经验进行有效选取(一个有效的方案是 $m=5, n=3, x_0=0.5$)，也可以在实际工程中通过仿真进行参数优化，针对具体问题选择适当的参数。基于有限体积法的 CFD 计算、以及涡面元法，都可以支持在有限时间内进行流场仿真以及参数迭代，实现快速高效的寻优过程。

3. 汽车风洞中的收缩段气动轮廓设计问题

为了评估基于高－低阶多项式的收缩段气动轮廓设计优化效果，本文结合公司空气动力学－气动声学汽车风洞的建设研究工作，提出风洞收缩段气动轮廓设计问题。下文将对具体优化问题、数值仿真设置、以及智能优化算法的选择进行详细说明。

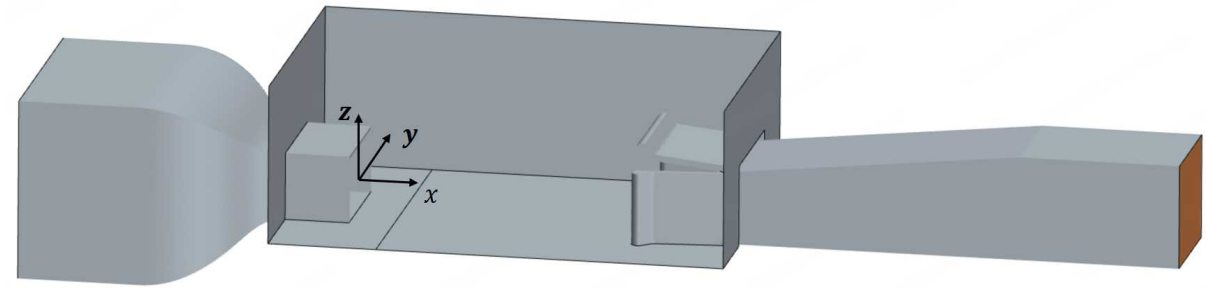

Figure 5. Schematic of automotive aerodynamic-aeroacoustic wind tunnels
图 5. 典型的汽车空气动力学－气动声学风洞的几何效果图

3.1. 优化问题

图 5 展示了典型的汽车空气动力学－气动声学风洞的几何效果图。参考该类风洞的常用设计方案，给出收缩段的约束条件如下。收缩段出口处的横截面积为 4 m×7 m，收缩段的长度。约束收缩段的截面收缩比为 6，本问题中不约束单方向的收缩比。参照典型车辆测试工况，定义来流速度为 40 m/s。本研究希望通过设计 Y_0 和 Z_0 截面上的收缩段的气动轮廓，使得以下损失函数 J 达到最小值：

$$J = J_a + \gamma J_b \tag{7}$$

公式中 J_a 代表收缩段出口处的流场均匀度，J_b 为出口截面处垂直流向速度分量的标准差。上述定义可以充分作为对出口截面处气流均匀、平直的优化目标的数学表达。

在本文中，根据风洞设计经验，取权重系数 $\gamma = 0.1$。

根据高－低阶多项式的数学表达式，本工作将对 Y_0 和 Z_0 截面收缩段气动轮廓参数进行同步优化。优化参数包括两个截面上的低阶多项式阶次 m, p，高阶多项式阶次 n, q，连接点的位置 x_m，Y_0 和 Z_0 方向的收缩比 CR_y。各个参数的取值范围见表 1 所示。

Table 1. Parameter list in the contraction aerodynamic optimization problem
表 1. 收缩段气动轮廓优化问题中的参数列表

参数	值
固定参数	
出口截面($H \times W$)	4 m × 7 m
流向长度(L)	11.5 m
总收缩比(CR)	6
出口速度(U)	40
优化参数	
低阶多项式阶次(m, p)	3~5
高阶多项式阶次(n, q)	5~8
连接点位置(x_m)	[0.2, 0.8]
Y_0 方向收缩比 CR_y	[1.63, 3.67]
Z_0 方向收缩比 CR_z	[1.63, 3.67]

3.2. 数值仿真

应用计算流体力学软件 Star-CCM+进行收缩段流场的数值仿真计算。通过不可压缩气体的稳态流动进行定常计算。采用六面体 + 棱柱层的自动化网格划分，对网格的特征尺寸、边界层网格的层数，厚度和增长率进行约束。在优化开始前进行了网格无关性研究，研究了精细、一般、粗糙的网格尺寸对于损失函数值的影响，最终采用的网格数量约为 150 万。用于 CFD 数值计算的一般模型及网格划分情况如图 6 所示。计算模型采用 $k-\omega$ SST 湍流模型，采用壁面函数模拟近壁流动，采用分离隐式求解器。压力速度耦合采用 SIMPLE 算法。压力、动量、湍流度方程均采用二阶迎风格式。边界条件设置如下：稳定段入口设为速度入口，速度大小为 30 m/s，湍流强度设为 1%。出口设为压力出口，压强为标准大气压强。流体选用理想气体。

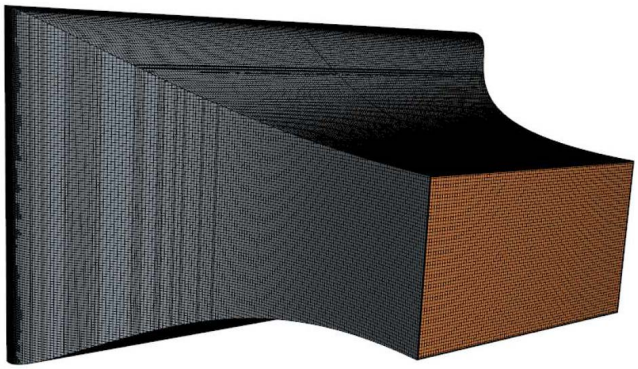

Figure 6. General contraction geometry and meshing for CFD simulations
图 6. 用于 CFD 数值计算的一般收缩段模型及网格划分示意图

3.3. 智能优化算法

近年来基于人工智能技术的优化算法逐渐获得更多的关注。该类算法可以处理传统优化理论难以解决的高维复杂的问题，在寻找全局最优解，以及强非线性问题时，可以有效避免陷入局部最优，适用于

各种类型的优化问题。本文采用遗传算法对约束条件下的收缩段气动轮廓进行优化。遗传算法是一种模仿自然进化过程，来解决优化和搜索问题的启发式算法。通过遗传学的机制如选择、交叉和变异来逐代进化出更优的解决方案。如图 7 所示，算法流程开始于随机生成的一组初始个体。通过评估每个个体的损失函数，决定其在后代中的再生几率。此外，算法模仿自然界进化过程，通过参数交叉和变异产生新的后代个体。该过程重复进行，直到满足某个终止条件停止。该算法具有强大的全局搜索、并行寻优、以及高适应性和灵活性等优点，是解决复杂优化问题的高效工具。

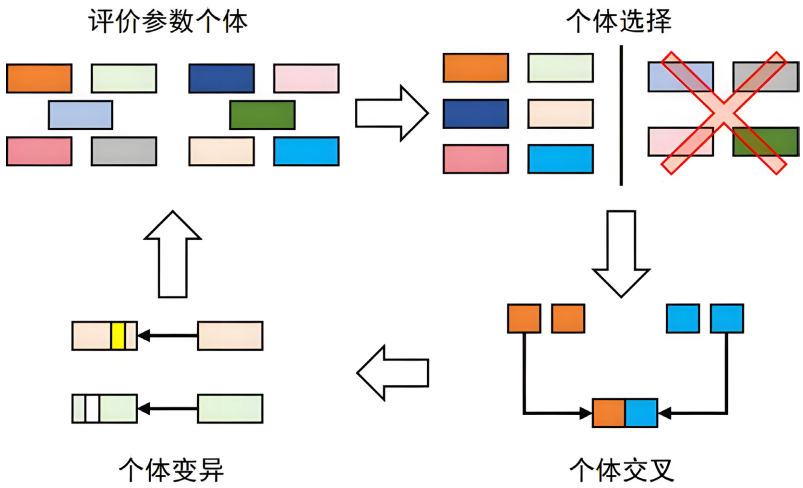

Figure 7. Key steps in genetic algorithm
图 7. 遗传算法关键步骤示意图

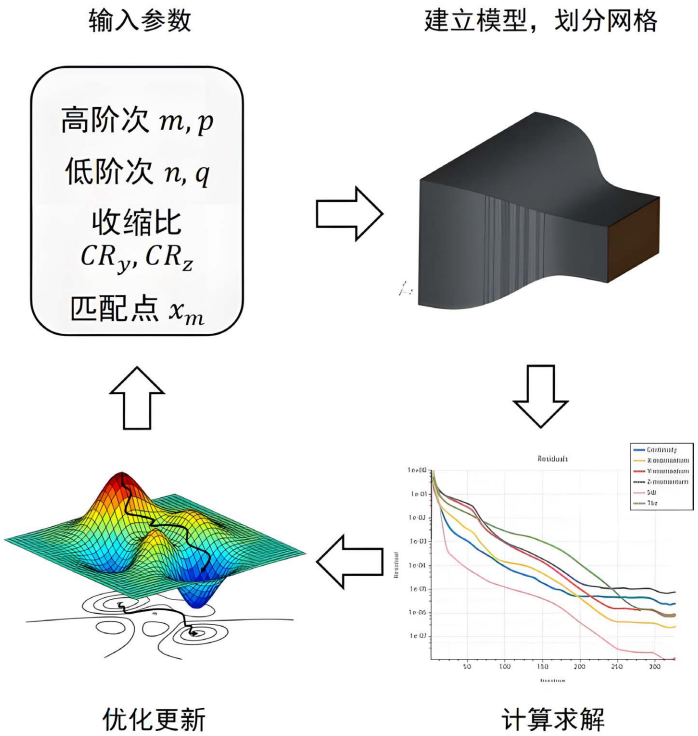

Figure 8. Flowchart of the optimization process
图 8. 优化流程示意图

本文优化试验基于某高性能工作站开展。算法对表 1 中列出的所有参数进行同步寻优，采用个体数为 10、进化轮次为 15 轮的优化方案。该方案对应的优化试验总时长约 70 小时。如图 8 所示，优化流程耦合了基于 Star-CCM+的流场求解器和基于 MATLAB 搭建的智能优化算法。接收到收缩段设计参数后，求解器根据输入值建立数值风洞模型，进行网格划分，边界条件设置。随后进行求解，待求解结束后通过后处理计算损失函数。求解器将损失函数取值传递给优化器，同时等待优化器通过智能算法对个体参数进行更新，进行新一轮计算。整个流程循环执行直到满足停止条件。

4. 优化试验结果和比较

图 9 给出了基于高－低阶多项式的风洞收缩段的优化设计试验结果。遗传算法优化过程中产生的中间个体所对应的损失函数由灰色圆点表示，其中最优解由黄色星形突出标识。为了便于比较，图中还给出了根据上述三种传统收缩段曲线设计方法对应的损失函数。由于双三次曲线可以通过调整连接点的位置调整气动轮廓改变对应损失函数，对其所对应的性能曲线进行计算，并在图中由红色曲线表示。在常用的三种收缩曲线中，维氏曲线对应的流场均匀度最差，该结论与[9]中得到的结果一致。五次方曲线的损失函数接近三次方性能曲线，但其轮廓不可调，不具有设计灵活性。值得注意的是，双三次方函数的性能曲线中，流向速度的均匀度和法向速度大小之间已经体现出负相关性，需要通过实际情况和设计要求，在两个损失函数之间进行取舍权衡。

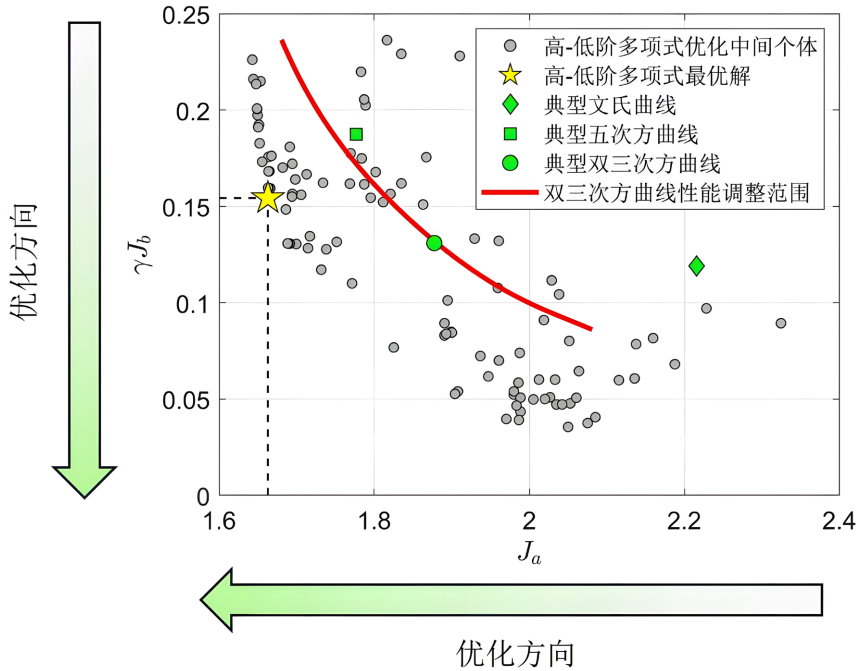

Figure 9. Visualization of wind tunnel contraction optimization experiment
图 9. 风洞收缩段优化试验结果可视化

由于双三次方曲线在传统设计方法中性能最佳，用其作为衡量标准与基于高低阶多项式的收缩段设计方法进行评估。可以看到，高－低阶多项式产生的中间个体中，约 65%都位于双三次方性能曲线外侧，证明该方法在优化过程中产生的大多数个体性能均已突破传统方法的边界。相较于双三次曲线对应的最优损失函数，基于高－低阶多项式的设计优化方法可以进一步实现 5.2%的性能提升。该结果证明，通过拓宽设计边界、匹配优化算法进行收缩段设计，可以在传统设计方法的基础上，进一步实现性能突破。

此外，图中所示的最优结果仅针对本次研究定义的权重系数γ。如果设计需要对权重系数进行调整，则可沿图中个体离散点组成的帕累托锋面进行滑动调整。

在优化结果的基础上进行流场分析。从图 10 左侧中的出口截面流向速度分布可以看出，基于高-低阶多项式的设计优化方法可以得到最佳的流场均匀度，双三次、五次曲线次之，维氏曲线最差。除了收缩段壁面边界层的速度梯度外，靠近壁面处的速度过冲、以及收缩段中心处的速度缺失成为了流动不均匀度的主要来源。由于靠近壁面处的流体最先感知到收缩加速效应，而中心区域流场距离壁面较远，该类现象在收缩段的流场中不可避免。但是通过拓宽设计边界并开展智能优化，基于高－低阶多项式的设计方法可以将壁面压缩带来的不均匀度影响降至最低。类似的，图 10 中右侧展示了出口法向速度分布。由于本次优化实验中法向速度大小占据的权重较低，其总体效果略逊于双三次和维氏曲线。但相较而言，该方法下的法相速度并未在壁面附近和顶点处发生明显的流场畸变，出口处的流场更为稳定均匀。

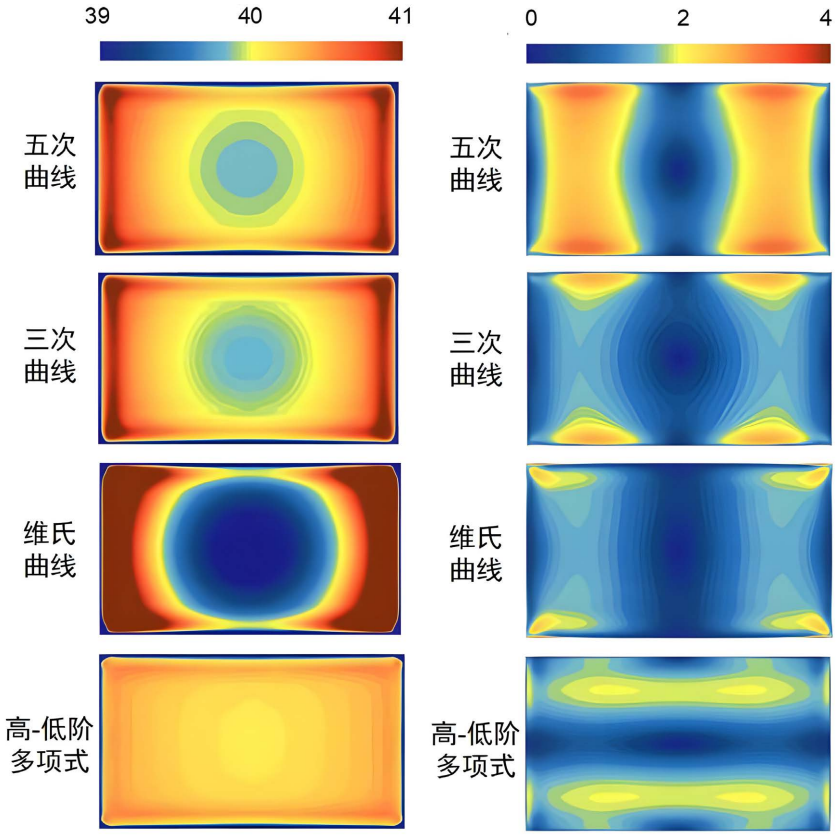

Figure 10. Comparison of streamwise velocity (left) and normal velocity distribution (right) at the outlet cross-section from different nozzle contraction designs, unit: m/s

图 10. 不同收缩段设计方法得到的出口截面流向速度(左)和出口截面法向速度分布(右)分布对比图，单位：m/s

5. 结论

本文提出了一种基于高－低阶多项式的风洞收缩段智能设计优化方法。该方法通过收缩段气动造型的智能优化，可以有效保障风洞的高品质流场。参照某汽车风洞关键设计参数，通过结合 CFD 仿真和智能优化算法，得到关键结论如下：

- 耦合高－低阶多项式的收缩段气动轮廓可以确保收缩段上下游的平滑过渡。相较维氏曲线，可以有效避免进口收缩速度过快、出口平缓导致的逆压梯度较高、剪切层过厚等问题；相较双三次曲线、

五次方曲线设计灵活性更强；

- 基于 CFD 仿真的人工智能优化可以保障在有限时间内对高－低阶多项式的关键参数进行快速优化。数值试验结果表明，智能优化结果可以打破设计边界，在传统设计方法的基础上，实现进一步性能突破；
- 基于人工智能的优化设计方法可以进一步拓展并应用到各个空气动力学应用领域中，为气动开发发挥积极作用。

参考文献

[1] Schuetz, T.C. (2015) Aerodynamics of Road Vehicles. 5th Edition, SAE International.

[2] 贾青, 杨志刚, 李启良. 汽车风洞试验段流场的试验研究[J]. 实验流体力学, 2011, 25(6): 5.

[3] 李国文, 徐让书. 风洞收缩段曲线气动性能研究[J]. 实验流体力学, 2009, 23(4): 73-76.

[4] Barlow, J.B., Pope, A., Harper, J.J., *et al*. (1999) Low-Speed Wind Tunnel Testing. 3rd Edition, John Wiley & Sons.

[5] 苏耀西, 林超强, 洪流. 三维收缩段设计问题[J]. 航空学报, 1992(2): 7-13.

[6] 李启良, 杨志刚. 计算流体力学在气动——声学风洞设计中的应用[J]. 空气动力学学报, 2009, 27(3): 373-377.

[7] 张伟伟, 寇家庆, 刘溢浪. 智能赋能流体力学展望[J]. 航空学报, 2021, 42(4): 26-71.

[8] Waudby-Smith, P., Bender, T., Sooriyakumaran, C., *et al*. (2024) The New China Automotive Technology and Research Center Aerodynamic-Acoustic and Climatic Wind Tunnels. SAE Technical Paper.

[9] 高丽敏, 刘哲, 蔡明, 等. 四种风洞收缩段流场特性对比[J]. 航空动力学报, 2020, 35(8): 1695-1705.