

# 多目标全自动尾翼安装集成优化方法

朱 晖<sup>1,2</sup>, 杨志刚<sup>1,2</sup>, 刘成龙<sup>1,2</sup>

(1. 上海地面交通工具风洞中心, 上海 201804; 2. 上海市地面交通工具空气动力与热环境模拟重点实验室, 上海 201804)

**摘要:** 通过引入最优拉丁超立方实验设计法、代理模型、多岛遗传算法, 并编写相关程序搭建全自动集成优化平台. 基于该平台, 以车翼结合体为对象, 以尾翼攻角及离地间距为设计变量, 获得满足设定优化目标的尾翼安装位置, 并通过数值仿真验证其有效性的同时揭示其内在机理. 最后, 明确该集成优化平台的高效适用范围.

**关键词:** 集成优化; 尾翼; 数值仿真

**中图分类号:** O355; U461.1

**文献标志码:** A

## Automatic Integrated Multi-objective Optimization for Spoiler

ZHU Hui<sup>1,2</sup>, YANG Zhigang<sup>1,2</sup>, LIU Chenglong<sup>1,2</sup>

(1. Shanghai Automotive Wind Tunnel Center, Shanghai 201804, China; 2. Shanghai Key Laboratory of Vehicle Aerodynamics and Vehicle Thermal Management Systems, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** An automatic integrated multi-objective optimization platform was built by using optimal Latin hypercube design method, approximation model, multiple-island genetic algorithm and compiled program. Based on the platform, the installation position of spoiler was obtained to meet the optimization objective requirements with attack angle and ground clearance as experimental variables. By simulation results, the validity was confirmed and the internal mechanism was revealed. Finally, the scope of efficient application was clarified.

**Key words:** integrated optimization; spoiler; numerical simulation

的研究热点之一<sup>[2-5]</sup>, 其内容包括翼型选择及优化、安装位置设定及优化、支撑形式设计及优化.

针对尾翼的优化方法有两种: 直接法和代理模型法. 与直接法相比, 代理模型法的优势在于显著减少实验(仿真)工作量的同时进行样本空间的快速寻优<sup>[6-7]</sup>. 目前, 代理模型法主要用于二维翼型断面优化及独立翼型姿态优化, 较少涉及车翼结合的空气动力特性优化问题<sup>[8]</sup>.

本文通过整合管理软件、外部更新程序及功能软件, 搭建实现实验设计、几何更新、网格划分、计算流体力学(CFD)仿真、代理模型寻优的全自动优化平台. 以三维车翼结合体为对象, 揭示尾翼安装角度及高度对车翼结合体气动特性的影响规律, 获取并分析既定气动目标的优化结果.

## 1 集成优化平台的搭建

本文使用管理软件 Isight 中的应用组件 Simcode 集成功能软件 Siemens NX, ICEM CFD 和 Fluent, 调用 Isight 软件中的 DOE 任务组件进行样本空间设定.

图 1 为计算流体力学(CFD)仿真集成原理图. 它包含一个流程组件和三个不同名称的 Simcode 应用组件: Siemens NX 组件完成仿真中的几何更新功能, ICEM CFD 组件实现网格划分功能, Fluent 组件实现数值计算功能. Simcode 组件通过执行指令实现调用外部应用程序, ug.bat, icem cfd.bat 和 fluent.bat 是各应用组件的外部程序命令文件.

几何建模文件包括: 初始几何模型文件(model.prt)、模型参数文件(model.exp)、模型更新程序(ugupdate.exe)、外部程序命令文件(ug.bat)、更新的几何模型文件(model.x\_t). 其中初始几何模型文

在汽车尾部安装尾翼是提高稳定性和安全性的有效措施<sup>[1]</sup>, 但需付出气动阻力增高的代价. 为此, 汽车尾翼气动特性分析及优化成为汽车空气动力学

收稿日期: 2014-06-27

基金项目: 国家“九七三”重点基础研究发展计划(2011CB711203); 上海市科学技术委员会资助项目(11DZ2260400); 上海市地面交通工具风洞专业技术服务平台(14DZ2291400)

第一作者: 朱 晖(1977—), 男, 讲师, 工学博士, 主要研究方向为汽车空气动力学. E-mail: zhuhuisuccess@163.com

通讯作者: 杨志刚(1961—), 男, 教授, 工学博士, 主要研究方向为流体力学. E-mail: zhigangyang@tongji.edu.cn

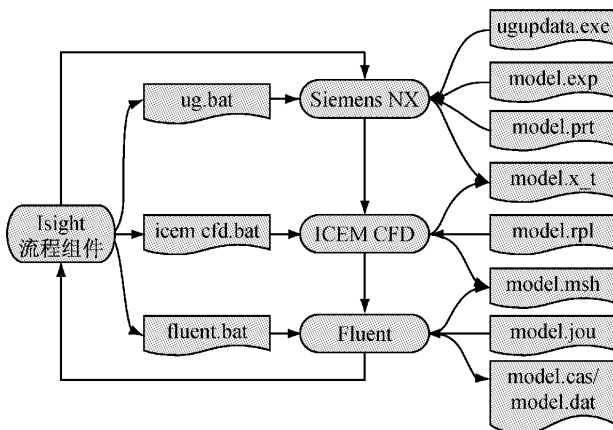


图 1 集成原理图

Fig.1 Integration schematic diagram

件和模型参数文件由 Siemens NX 组件参数化建模实现. 几何模型更新程序根据自主开发的源代码编译生成(编译软件为 Microsoft Visual Studio 2010).

网格划分文件包括:更新的几何模型文件(model. x\_t)、网格划分命令文件(model. rpl)、外部程序命令文件(icem cfd. bat)、生成的网格文件(model. msh).

CFD 仿真文件包括:网格文件(model. msh)、外部程序命令文件(model. jou, fluent. bat)、仿真数据文件(model. case 和 model. dat).

图 1 中所有 Simcode 组件的输入输出文件和命令文件都应根据文件本身的性质来定义其来源路径(Source)和目标路径(Destination). 对于输入文件,来源路径表示组件运行前文件所在的位置,目标路径表示运行环境将输入文件复制到的目录;对于输出文件,来源路径表示组件运行结束输出文件所在目录,目标路径表示组件运行环境删除前,文件将被复制到的目录. 图 2 为组件输入输出文件路径设置图.

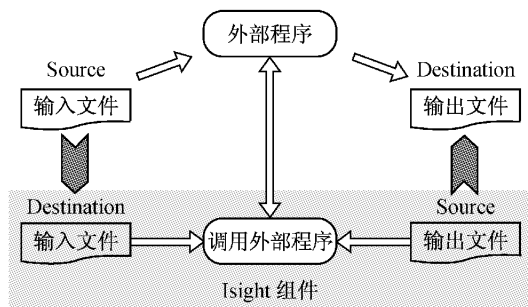


图 2 输入输出文件路径设置图

Fig.2 Structure map of input/output file path

各组件输入文件的路径设置见表 1. 输入文件 Source 采用 In Model 和 Mapped 两种类型. In

Model 类型需要指定文件的路径并封装, Mapped 类型无需指定文件路径. 所有输入文件的 Destination 都是管理软件运行目录, 以 {rundir} 表示, 文件类型选择 Fixed File Name. 表 2 为各组件输出文件的路径设置, 采用 Isight File Manager 和 Specific Location 两种路径类型.

表 1 输入文件路径设置

Tab.1 Input files path configuration		
Simcode	Source	Destination
Siemens NX	In model;	Fixed File Name;
	D:\model\nx\model. exp	{rundir}/model. exp
	D:\model\nx\model. prt	{rundir}/model. prt
	D:\model\nx\ug. bat	{rundir}/ug. bat
	D:\model\nx\ugupdata. exe	{rundir}/ugupdata. exe
ICEM CFD	Mapped none;	Fixed File Name;
	model. x_t	{rundir}/model. x_t
	In model;	{rundir}/icem cfd. bat
	D:\model\icem\icem cfd. bat	{rundir}/project1. rpl
Fluent	Mapped none;	Fixed File Name;
	fluent. msh	{rundir}/fluent. msh
	In model;	{rundir}/fluent. bat
	D:\model\fluent. bat	{rundir}/model. jou
	D:\model\model. jou	

表 2 输出文件路径设置

Tab.2 Output files path configuration		
Simcode	Source	Destination
Siemens NX	Mapped yes;	Isight File Manager
	D:\model\nx\model. x_t	
ICEM CFD	Mapped yes;	Isight File Manager
	D:\model\icem\fluent. msh	
Fluent	D:\model\fluent\fluent. cas	Specific Location
	D:\model\fluent\fluent. dat	
	D:\model\fluent\output. jou	
		{rundir}/fluent. cas
		{rundir}/fluent. dat
		{rundir}/output. jou

## 2 优化问题、实验矩阵及数值仿真

尾翼的安装对车翼结合体的气动升/阻力皆有影响,所以本文在设计空间内设定三个优化目标(优化目标 1~3):阻力系数极小,升力系数减小(升力向上为正);升力系数 $\leq -0.1$ 且阻力系数极小;升力系数极小.

由于尾翼攻角和离地间距对汽车的气动特性影响显著,因此本文的设计变量为攻角  $\alpha$  和离地间距  $h$ ,实验响应为整车阻力系数和升力系数. 攻角值域为 $[-20^\circ, 3^\circ]$ ,离地间距值域为 $[1\ 135, 1\ 250]$  mm,两个设计变量皆取 13 个水平.

全因子实验需进行 169 次数值仿真,计算量巨大,需引入其他实验设计法. 本文在最优拉丁超立方实验设计法(该方法使得样本点在设计空间上分布更加均匀<sup>[9]</sup>)选取样本点的基础上再增加 1 倍样本

点(共 26 个),如图 3 所示,图中数字为样本点编号。

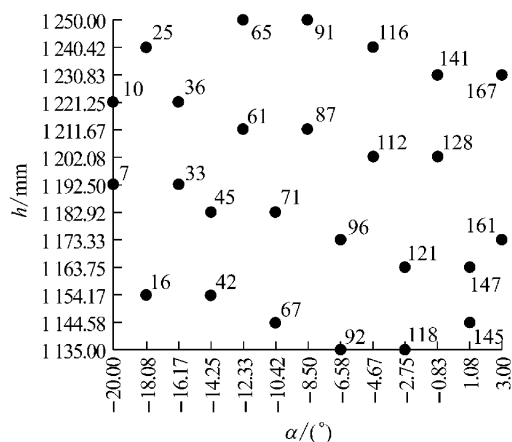


图 3 实验矩阵

Fig.3 Experiment matrix

整车模型主要尺寸:长 4 530 mm,宽 1 968 mm,高 1 356 mm,正投影面积 1.884 m<sup>2</sup>.具体构造如图 4 所示.以 NACA\_2412 翼型作为尾翼截面形状,尾翼弦长 200 mm,尾翼宽 1 400 mm.图 5 显示了车身及部分区域的面网格分布,具体设置见表 3,体网格总数为 1 880.0 万单元。

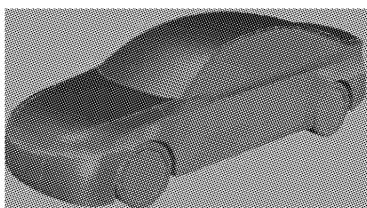


图 4 整车模型

Fig.4 Vehicle model

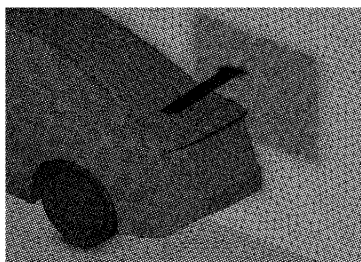


图 5 面网格分布

Fig.5 Distribution of surface mesh

表 3 网格参数设置

Tab.3 Mesh parameter setup

区域	面网格/mm	体网格/mm	边界层/mm
车身	24.0	64.0	7.4
底盘	24.0	64.0	7.4
轮胎	12.0	64.0	7.4
尾翼	2.0	16.0	7.4
地面	200.0	200.0	7.4
壁面	200.0	200.0	0

仿真采用 Realizable  $k-\epsilon$  湍流模型结合非平衡壁面函数方法.边界条件设置见表 4.来流速度为 30 m·s<sup>-1</sup>,湍流强度及湍流黏性比分别为 1%和 10,出口湍流强度及湍流黏性比设置与进口相同。

表 4 边界条件

Tab.4 Boundary conditions

进口	出口	地面	车体	其他
速度进口	压力出口	移动壁面	无滑移壁面	对称面

图 6 为根据实验样本点矩阵得出的 26 组数值仿真数据,其中  $C_D$  为气动阻力系数, $C_L$  为气动升力系数.至此,形成优化过程所需的初始数据库。

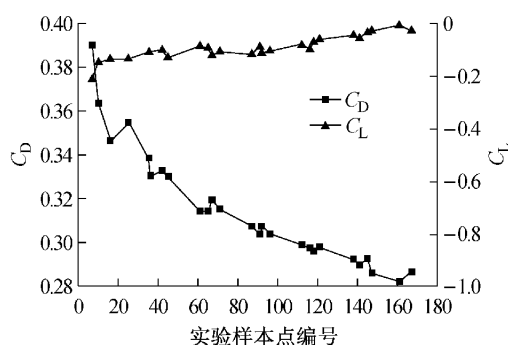


图 6 数值计算仿真结果

Fig.6 Results of computational fluid dynamical simulation

### 3 近似模型可信度及优化

近似模型法是通过数学模型拟合逼近输入变量与输出变量关系的方法,常用的近似模型有响应面模型、正交多项式模型、克里格模型等,其复相关系数( $R^2$ )越接近 1 表示近似模型越准确。 $R^2$  可以通过以下相关公式求得:

$$R^2 = (Y - E)/Y \quad (1)$$

$$Y = \sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2 \quad (2)$$

$$E = \sum_{i=1}^m (y_i - \tilde{y}_i)^2 \quad (3)$$

式中: $Y$  是响应值与响应均值差平方和; $E$  是响应值与响应估计值差平方和。

表 5 为不同近似模型的阻力系数及升力系数复

表 5 近似模型复相关系数

Tab.5  $R^2$  of approximation models

近似模型	$C_D$ 复相关系数	$C_L$ 复相关系数
响应面	0.945 4	0.806 0
正交多项式	0.973 1	0.900 6
克里格	0.962 7	0.885 2

相关系数.由表5可知,正交多项式模型近似结果最优,克里格模型次之,响应面模型最差.因此,本文基于正交多项式近似模型进行整车气动特性优化.

图7显示了正交多项式近似模型的计算结果.至此,近似模型选择完毕.

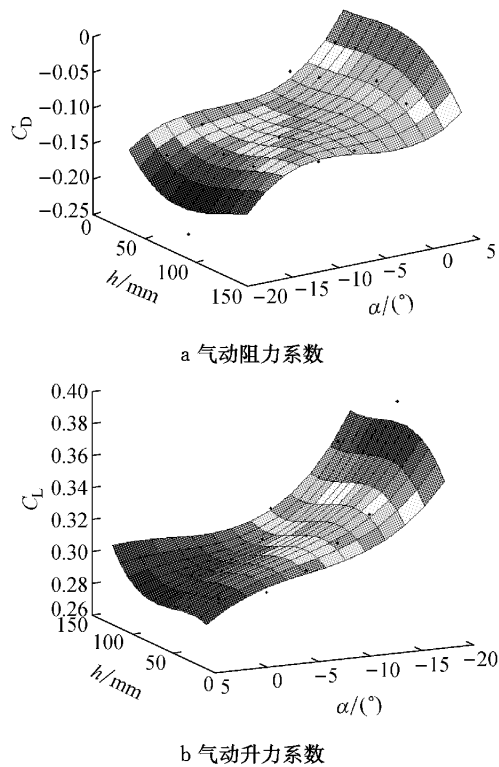


图7 正交多项式近似模型的计算结果  
Fig.7 Results of orthogonal polynomials approximation model

根据文献[10]的研究成果,采用多岛遗传算法进行优化.优化结果分别为:攻角  $3.00^\circ$ 、离地间距  $1\,196.93\text{ mm}$  时,满足优化目标1;攻角  $-3.98^\circ$ 、离地间距  $1\,248.91\text{ mm}$  时,满足优化目标2;攻角  $-20.00^\circ$ 、离地间距  $1\,183.52\text{ mm}$  时,满足优化目标3.

表6为原车模型气动特性与车翼结合体优化目标结果比较.由表6可知,优化目标1的气动升力系数显著减小且其阻力系数极小;优化目标2升力系数减小了219%,其阻力系数增加了6.8%;优化目标3的升力系数极小.

表6 原车模型与优化目标气动特性

Tab.6 Aerodynamic feature of original model and optimization objectives

模型	$C_d$	$C_L$	阻力/N	升力/N
原车模型	0.283 1	0.083 5	294	87
优化目标1	0.278 8	$\approx 0$	290	$\approx 0$
优化目标2	0.301 9	-0.100 0	314	-104
优化目标3	0.377 3	-0.181 8	392	-189

## 4 优化结果验证分析

为验证优化结果的准确性,本文对比了近似模型优化及数值仿真两者结果,如表7所示.优化目标1阻力系数误差为-1.80%,优化目标2阻力系数及升力系数误差分别为+1.55%和-6.10%,优化目标3阻力系数及升力系数误差分别为+2.75%和+5.09%.总体上近似模型针对升力系数的计算精度略差.

表7 优化结果验证

Tab.7 Validation of optimization results			
模型	结果来源	$C_d$	$C_L$
优化目标1	数值计算	0.284 0	$\approx 0$
	近似模型	0.278 8	$\approx 0$
优化目标2	数值计算	0.297 3	-0.106 5
	近似模型	0.301 9	-0.100 0
优化目标3	数值计算	0.367 2	-0.173 0
	近似模型	0.377 3	-0.181 8

图8为原车及车翼结合体优化目标外部绕流纵向对称面速度流线图(速度值范围 $[0, 65]\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,颜色越深速度值越小).由图8可知,尾翼的安装主要影响汽车尾部流态.优化目标1中尾翼基本与尾部流线平行,对尾部流场干扰极小,但由于其为非对称翼型,因此降低了车翼结合体的气动升力;优化目标2中尾翼攻角变小,尾翼上方压力水平增加从而产生一定的下压力,同时尾翼周围几乎没有发生流动分离,因此车翼结合体的气动阻力增加甚少;优化目标3中尾翼攻角最小,尾翼周围出现严重流动分离,其下侧出现较大低压区,因此在产生极大下压力的同时气动阻力增加显著.

图9为尾迹区横截面压力流线图(压力范围 $[-10, 45]\text{ Pa}$ ).由图9可知,优化目标1尾部分离区略大于原车,其气动阻力增加0.31%;优化目标2中尾翼翼尖涡明显,但未与尾部分离区融合,其气动阻力增加5.02%;优化目标3中尾翼分离区与车翼结合体尾部大分离区融合,其气动阻力增加29.71%.

## 5 结论

(1) 全自动集成优化平台在相关组件配置完成后,全程无需人为介入,在提高效率的同时有效节约人力成本.

(2) 与全因子实验设计空间样本点相比,最优拉丁超立方实验设计法减少约84.6%的工作量.

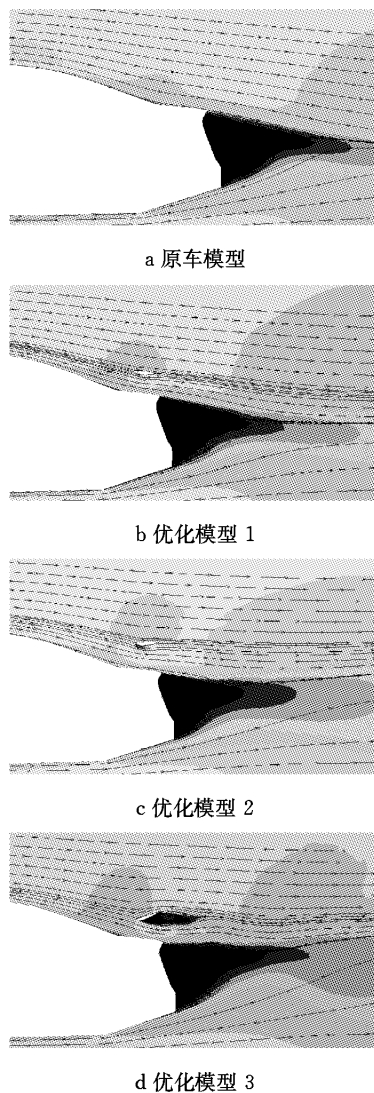


图 8 纵向对称面流线图

Fig.8 Streamline of symmetry plane

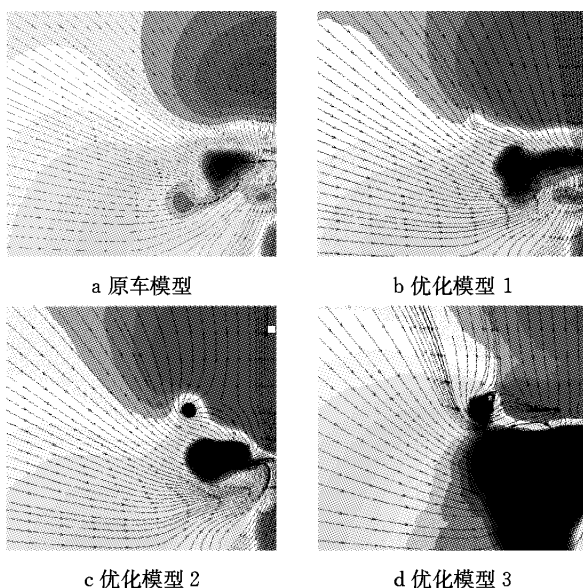


图 9 横截面压力流线图

Fig.9 Pressure and streamline of transverse plane

(3) 经数值仿真检验,基于代理模型的优化方法获得了较高精度的优化结果,且符合空气动力学的基本认知。

该优化平台及相关方法的高效适用范围:产品初期及中期设计阶段和产品组件相对位置的优化

#### 参考文献:

- [1] Hucho W H. Aerodynamics of road vehicles [M]. 4th ed. Detroit: SAE World Congress & Exhibition, 2004.
- [2] Katz J. Race car aerodynamics: designing for speed [M]. Detroit: Robert Bentley Inc., 1996.
- [3] 康宁,姜岩. 尾翼攻角对斜背式轿车气动特性影响的研究[J]. 空气动力学学报, 2006, 24(2): 233.  
KANG Ning, JIANG Yan. The study of aerodynamic characteristics of a notch back car with rear wing at different angles of attack [J]. ACTA Aerodynamic Sinica, 2006, 24(2): 233.
- [4] 张英朝,韦甘,张喆. 不同尾翼两厢轿车的气动特性数值模拟[J]. 吉林大学学报:工学版, 2011, 41(1): 1.  
ZHANG Yingchao, WEI gan, ZHANG Zhe. Aerodynamic numerical simulation of hatch-back car with different spoilers [J]. Journal of Jinlin University: Engineering and Technology Edition, 2011, 41(1): 1.
- [5] 谷正气,郭建成. 某跑车尾翼外形变化对气动升力影响的仿真分析[J]. 北京理工大学学报, 2013, 32(3): 248.  
GU Zhengqi, GUO Jiancheng. Simulation study into the influence of appearance variation of a sport car's rear wing on the aerodynamic lift [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2013, 32(3): 248.
- [6] 龙腾,刘莉. 基于代理模型的翼型多目标集成优化设计[J]. 系统仿真学报, 2010, 22(7): 1604.  
LONG Teng, LIU Li. Multi-objective integrated optimization of airfoil based on surrogate model [J]. Journal of System Simulation, 2010, 22(7): 1604.
- [7] 范庆明,曹岩. 基于 iSIGHT 平台翼型气动优化 CAD/CFD 集成技术研究[J]. 机械设计与制造, 2011(8): 70.  
FAN Qingming, CAO Yan. Research on aerodynamic optimal CAD/CFD integration of airfoil type based on iSIGHT [J]. Machinery Design & Manufacture, 2011(8): 70.
- [8] 容江磊,谷正气. 基于 Kriging 模型的跑车尾翼断面形状的气动优化[J]. 中国机械工程, 2011, 22(2): 243.  
RONG Jianglei, GU Zhengqi. Aerodynamic optimization of cross sectional shape for a sports car's rear wing based on Kriging surrogate model [J]. China Mechanical Engineering, 2011, 22(2): 243.
- [9] Felipe A C, Gerhard V, Vladimir B. An algorithm for fast optimal Latin hypercube design of experiments [J]. Numerical Methods in Engineering, 2010, 82(2): 135.
- [10] 高丽,曾庆良,范文慧. 多学科设计优化中的智能算法比较[J]. 计算机应用研究, 2008, 25(1): 93.  
GAO Li, ZENG Qingliang, FANG Wenhui. Intelligent algorithms application and comparison on multidisciplinary design optimization [J]. Application Research of Computers, 2008, 25(1): 93.