

高速列车车厢夹层板断面结构的多目标优化

陈旭¹, 王伊卿¹, 孙琨², 冯正义¹, 赵万华¹, 卢秉恒¹

(1. 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安;

2. 西安交通大学材料科学与工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为获得不同运行速度和工况下的高速列车车厢侧墙结构,在拓扑优化结构的基础上进行了多目标优化研究。将侧墙夹层板质量、柔度、最大变形作为优化目标,以侧墙 5 段夹层结构的面板和夹心厚度为变量、车厢气压变化梯度为约束函数,利用代理模型技术,建立了各目标、约束函数与变量之间的代理模型,通过非支配遗传算法 NSGA-II,得到了多目标的 Pareto 解集。该 Pareto 解集中的夹层板结构比拓扑优化得到的夹层板结构的最大变形性能提高了 8.21% 到 33.58%,设计时可根据具体的要求和经验从 Pareto 解集中进行选择,从而为不同运行速度和工况下的高速列车车厢断面结构的设计提供了多种选择方案。

关键词: 夹层板;代理模型技术;NSGA-II 算法;多目标优化;Pareto 优化解集

中图分类号: TH122 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)01-0062-06

Multi-Objective Optimization for Section of Sandwich Plate Applied to High-Speed Train Compartments

CHEN Xu¹, WANG Yiqing¹, SUN Kun², FENG Zhengyi¹, ZHAO Wanhua¹, LU Bingheng¹

(1. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. School of Material Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To investigate the structures of high speed train side walls applicable to different running speeds and operation conditions, a multi-objective optimization design is carried out following structure topology optimization. The weight of sandwich plate, static compliance and maximum deformation are defined as the objectives, the thickness of face panels and cores in five parts of the side wall as the variables while the changing air pressure gradient in compartments as the constraint. The surrogate model techniques are implemented for constructing the response surfaces of objective and constraint functions. Then a multi-objective optimization is performed with NSGA-II to generate a Pareto solution set. The structure performance in Pareto set is greatly improved by 8.21% to 33.58% than that from topology structure, besides, the Pareto solution set provides many alternative Pareto-optimal solutions for optimization design of the sandwich plate section in high-speed trains.

Keywords: sandwich plate; surrogate model; NSGA-II algorithm; multi-objective optimization; Pareto optimal solution set

目前,我国的高速列车动车组(CRH)系列^[1]沿用了国外 90 年代的基本车型,但中国地域宽广,当

高速列车横跨多个不同地域时,由于气候差别较大,因此高速列车的运行环境与国外有较大的差别^[2]。

收稿日期: 2012-06-06。 作者简介: 陈旭(1986—),男,硕士生;王伊卿(通信作者),男,副教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50975221);国家重点基础研究发展计划资助项目(2006GB601201B)。

网络出版时间: 2012-00-29

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20121029.1700.005.html>

例如,在武汉—广州的运营里程(1 068.6 km)线路中,穿越桥梁 684 座、隧道 226 个,桥隧比达 66.7%,并且要求高速列车穿越隧道时不能减速,时速仍然在 350 km/h 以上,因此车厢面临巨大的气动冲击载荷,如果在隧道内会车,车厢的气动冲击载荷将会更大。高速列车巨大的气动冲击载荷会造成车厢结构的振动,导致乘客发生耳鸣、头晕等现象,严重影响了乘坐的舒适性^[3]。因此,有必要根据国内的高速列车运行环境,对目前的高速车厢结构进行优化设计。

关于高速列车车厢的结构设计研究,普遍集中在 2 个方面:①在局部的强度、刚度校核的基础上,对原有车厢局部结构进行尺寸优化设计^[4];②对于静态载荷下的单目标优化设计研究,一般是以车厢质量为目标、以最大变形为约束条件来进行优化设计^[5]。高速列车工况载荷复杂,受到静态载荷和动态载荷的影响,因此优化时应同时考虑这 2 个因素。另外,高速列车车厢结构的性能指标很多,如质量、刚度等,针对不同的运行速度、运行环境,优化设计所追求的目标也不同。为了使各个目标之间达到一个较好的平衡,需要对高速列车车厢结构进行多目标优化设计。多目标优化设计技术在汽车车厢结构的优化设计中得到了成功应用^[6],而关于高速列车铝合金车厢的多目标优化设计的报道则很少,拓扑优化能够根据结构的受力形式,优化出该受力条件下的材料布局和传力路径。与尺寸和形状优化相比,结构拓扑可以从根本上改善结构的性能,拓扑优化作为概念性设计已广泛应用于工业领域^[7]。

高速列车车厢夹层板断面结构的有限元模型庞大复杂,有几十万乃至上百万个单元,仿真需要超大的计算成本,为了降低计算成本,可以使用代理模型技术来替代实际的仿真模型^[8]。在对优化设计样本点的确定中,拉丁超立方抽样是目前最有效的试验设计方法^[9]之一,它采用等概率随机正交分布的原则,能够在极少试验样本点下得到较高精度的响应面方程。同时,拉丁超立方抽样的适应性强,样本点的个数可以人为确定,而均匀拉丁超立方抽样是在拉丁超立方抽样的基础上引入了熵判断的优化算法,要求 2 个样本点之间的最小距离最大,样本点才

能更加均匀地分布在样本空间中。目前,求解多目标优化问题的算法很多,非支配遗传算法 NSGA-II 是迄今为止最为优秀的多目标优化算法^[10-11]之一,它采用分级的非支配排序方法,引入精英保留政策和拥挤距离,使得算法的计算复杂度较小,解集能够尽可能地均匀遍布在整个 Pareto 解集前沿面上。

本文在利用拓扑优化概念性设计得到高速列车车厢夹层板断面结构的基础上,在静态和动态载荷下,对高速列车车厢侧墙夹层板断面结构进行了多目标优化设计。融合均匀拉丁超立方抽样技术、代理模型技术和多目标遗传算法 NSGA-II,以质量、柔度、最大变形指标为目标,气压变化梯度为约束,对高速列车车厢侧墙夹层板断面进行了多目标优化设计,求得 Pareto 优化解集,得到了各个目标之间的协调解。

1 车厢侧墙夹层板断面的多目标优化

1.1 车厢侧墙夹层板断面结构多目标优化问题

高速列车在运行时,侧墙夹层板断面受到多种载荷的作用,固定载荷有垂向均布载荷、垂向设备集中载荷、行李架载荷,在车厢表面还会产生静态空气压强载荷。高速列车在隧道中运行时,该气压载荷最大,车厢表面的交变气动载荷会导致车厢内气压的梯度变化,严重影响了乘坐的舒适性^[12]。因此,在设计时应以隧道中平稳运行时的载荷作为静态载荷,将隧道中交会时的气动载荷作为动态载荷进行优化设计。取沿车厢 30 mm 长的转向架处车厢断面作为优化设计对象,车厢断面优化的整个流程如图 1 所示。

以高速列车车厢侧墙夹层板断面拓扑优化结构为基础,进行高速列车车厢侧墙的多目标优化设计。考虑到中空挤压型材宽度^[1]为 600~800 mm,将侧墙结构分成 5 段,每一段的面板和夹心厚度 x_i ($i=1\sim10$)作为设计变量,共有 10 个变量,如图 2 所示。

优化设计目标函数有侧墙断面结构质量、侧墙柔度、侧墙最大变形静态性能指标,根据现有车厢结构尺寸确定设计变量的取值范围为 1.5~4.5 mm,约束函数为动态性能指标——气压变化梯度值,该值不能超过 300 Pa/s。

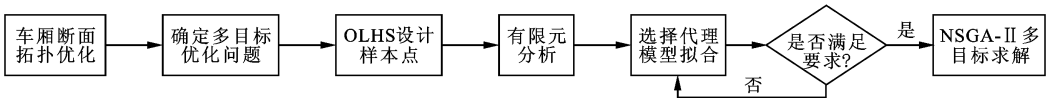


图 1 车厢夹层板断面结构的整体优化流程图

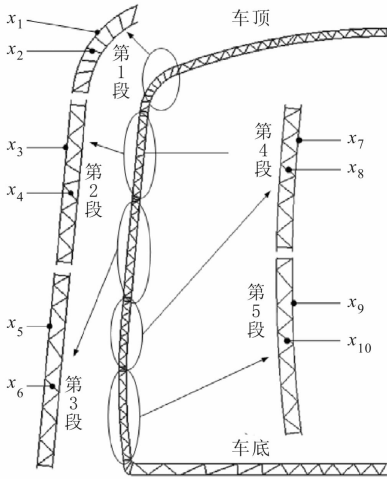


图 2 高速列车车厢侧墙的拓扑优化结构

1.3 求解代理模型

根据有限元分析得到的各个样本点的响应值,采用代理模型技术求得各个目标和约束函数的代理模型。由于多项式回归模型基函数简单,计算量小,易于实现,能够采用方差分析来检验模型^[8],因此本文采用多项式回归模型对样本点的相应值进行拟合。

对于多项式回归模型,在设计空间中,设计变量与实际响应值 y 之间的关系为

$$y(x) = y(x) + \epsilon = \sum_{j=1}^N a_j \phi_j(x) + \epsilon \quad (3)$$

式中: $y(x)$ 为近似函数; ϵ 为回归模型的误差; N 为基函数 $\phi_j(x)$ 的个数; a_j 为基函数系数,采用最小二乘法求解。

采用多项式代理模型得到目标函数和约束函数的代理模型如下

$$m(x) = (5.182\ 139\ 9x_1 + 3.769\ 233\ 5x_2 + 8.153\ 929x_3 + 6.591\ 825x_4 + 9.618\ 287\ 5x_5 + 7.437\ 544\ 8x_6 + 6.664\ 8x_7 + 6.332\ 1x_8 + 8.859\ 258\ 4x_9 + 6.571\ 243x_{10}) \times 10^{-2} \quad (4)$$

$$D(x) = 19.133 - 3.193x_1 - 0.456x_2 - 6.515x_3 + 1.502x_4 - 5.1x_5 + 0.205x_6 - 2.702x_7 - 0.450\ 9x_8 - 2.08x_9 - 1.77x_{10} + \dots - 8.016 \times 10^{-3}x_1^5 + 4.136 \times 10^{-4}x_2^5 - 6.575 \times 10^{-3}x_3^5 + 7.15 \times 10^{-3}x_4^5 - 6.119 \times 10^{-3}x_5^5 - 4.989 \times 10^{-4}x_6^5 - 5.885 \times 10^{-3}x_7^5 - 1.84 \times 10^{-3}x_8^5 - 1.301 \times 10^{-3}x_9^5 - 3.694 \times 10^{-3}x_{10}^5 \quad (5)$$

$$F(x) = 5\ 955 - 1\ 622x_1 - 505.5x_2 - 4\ 806x_3 + 389.5x_4 - 89.94x_5 + 274.4x_6 - 237.8x_7 + 85.05x_8 - 1.974x_9 - 732.2x_{10} + \dots - 3.768x_1^5 - 1.052x_2^5 - 5.929x_3^5 + 2.395x_4^5 - 0.168x_5^5 + 0.345x_6^5 - 1.071x_7^5 + 2.975 \times 10^{-2}x_8^5 + 0.276\ 5x_9^5 - 1.895x_{10}^5 \quad (6)$$

$$p(x) = 2\ 482 - 789.3x_1 - 1\ 000x_2 - 188.3x_3 - 46.76x_4 - 267.9x_5 - 57.84x_6 - 53.667x_7 - 45.75x_8 - 22.18x_9 - 9.028x_{10} + \dots + 6.322x_1^4 + 6.658\ 7x_2^4 + 0.987\ 4x_3^4 + 0.573\ 4x_4^4 + 1.746x_5^4 + 0.965\ 8x_6^4 + 0.120\ 5x_7^4 + 0.518\ 9x_8^4 - 0.555x_9^4 - 7.659 \times 10^{-2}x_{10}^4 \quad (7)$$

多目标优化问题的表达式为

$$\left. \begin{aligned} \min \quad & m(x), D(x), F(x) \\ \text{s. t} \quad & p(x) \leq 300\ \text{Pa/s} \\ & x = (x_1, x_2, \dots, x_{10}) \\ & 1.5\ \text{mm} \leq x_i \leq 4.5\ \text{mm}, i = 1, 2, \dots, 10 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: $m(x)$ 、 $D(x)$ 分别为车厢侧墙结构的质量和最大变形函数; $F(x)$ 为侧墙的柔度函数,表示车厢侧墙结构在变形过程中的吸能量; $p(x)$ 为常温大气压强。根据气体状态方程,气压变化梯度为

$$\frac{dp(t)}{dt} = \frac{p \sum_{i=1}^N w(h_i)}{(\sum_{i=1}^N (w(h_i) - w(t, h_i))^2) \sum_{i=1}^N \frac{dw(t, h_i)}{dt}} \quad (2)$$

式中: $w(h_i)$ 为侧墙初始宽度; $w(t, h_i)$ 是侧墙在不同时刻的宽度; t 为时间。

1.2 样本点的有限元分析

如图 3 所示,采用 MATLAB 程序语言编写程序,调用 Ansys 完成样本点的静态和动态有限元分析。静态有限元分析提取侧墙的质量、侧墙柔度、侧墙最大变形,动态有限元分析采用瞬态动力学分析模型,对车厢断面结构进行模态分析,计算出气压变化的梯度值。由于车厢总体积和外形的变化不大,因此不考虑流固耦合问题。设边界条件为 300~350 km/h,高速列车在隧道中交会时的气动载荷^[13]如图 4 所示。

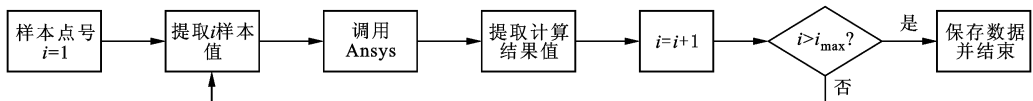


图 3 采用 MATLAB 语言对 Ansys 进行有限元分析的流程图

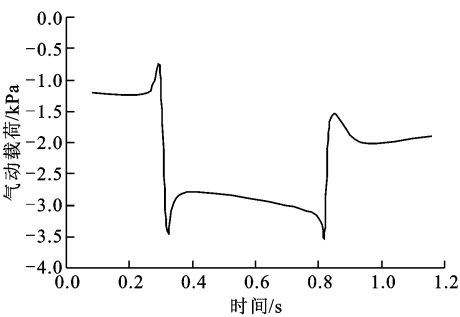


图 4 高速列车过隧道时车厢产生的气动载荷

对式(4)~式(7)进行方差分析,质量代理模型 $m(x)$ 的精度差 R^2 、 R_a^2 都为 1,拟合误差在 0.000 01 等级。柔度代理模型 $F(x)$ 的 R^2 、 R_a^2 值分别为 0.995 3、0.994 4,拟合误差范围在 $-0.069\ 3\%\sim 0.057\ 1\%$,平均拟合绝对值误差为 0.016%。侧墙最大变形代

理模型 $D(x)$ 的 R^2 、 R_a^2 值分别为 0.996 3、0.995 6,拟合误差范围在 $-0.040\ 2\%\sim 0.062\ 8\%$,平均拟合绝对值误差为 0.010 3%。车厢内气压变化梯度模型 $p(x)$ 的 R^2 、 R_a^2 值分别为 0.998 6、0.998 0,拟合误差范围在 $-0.016\ 8\%\sim 0.017\ 3\%$,平均拟合绝对值误差为 0.004 8%。

2 多目标优化求解结果的分析

采用非支配遗传算法 NSGA-II,引入约束非支配概念,设置交叉概率为 0.9,变异概率为 0.1,交叉分布指数和变异分布指数为 20,种群大小为 30,遗传迭代 1 000 次。对以上代理模型的多项式进行求解,结构变量 $x_1\sim x_{10}$ 对车厢结构各性能的影响规律见表 1。

表 1 高速列车侧墙夹层板性能与相应结构的 Pareto 解集

组	x_1 /mm	x_2 /mm	x_3 /mm	x_4 /mm	x_5 /mm	x_6 /mm	x_7 /mm	x_8 /mm	x_9 /mm	x_{10} /mm	质量 /kg	应变能 /J	最大变形 /mm
1	4.500	1.804	4.500	2.770	4.500	4.500	4.500	3.464	4.500	1.922	2.662	152.170	0.969
2	1.969	4.245	4.500	2.732	4.500	1.500	4.500	4.500	4.500	4.500	2.633	219.793	0.898
3	2.671	3.520	2.049	1.501	2.159	1.500	1.748	1.500	1.500	1.501	1.299	608.810	2.945
4	2.636	3.371	1.590	1.546	2.837	1.509	1.714	1.500	1.726	1.522	1.342	760.591	2.800
5	2.765	3.630	2.240	1.500	2.069	1.506	1.537	1.551	1.527	1.528	1.309	562.467	2.960
6	4.500	2.507	4.500	2.711	4.500	4.500	4.500	3.842	4.453	2.253	2.727	157.442	0.953
7	2.808	3.327	1.747	1.516	2.814	1.627	1.615	1.544	1.619	1.558	1.356	686.834	2.759
8	4.500	2.110	4.303	2.705	4.488	3.875	4.196	3.173	4.091	2.058	2.540	173.263	1.014
9	2.025	3.402	4.309	2.050	4.345	1.500	4.500	4.017	4.091	3.976	2.427	240.543	0.983
10	3.919	2.841	3.291	2.258	2.927	1.514	2.245	1.590	3.113	1.660	1.757	279.536	1.635
11	3.100	3.407	3.255	2.715	2.842	1.618	2.172	1.574	1.520	1.532	1.607	336.018	2.085
12	3.195	3.016	2.837	2.086	2.892	1.500	1.875	1.681	1.704	1.505	1.519	389.424	2.162
13	2.469	3.340	2.594	1.865	2.403	1.848	1.504	1.503	1.699	1.501	1.402	471.237	2.573
14	4.433	2.485	4.020	2.881	4.272	3.250	3.485	2.108	3.325	1.919	2.280	195.583	1.135
15	3.083	3.399	3.250	2.732	3.105	1.534	2.219	1.500	1.594	1.517	1.630	326.792	1.960
16	2.684	3.559	2.156	1.500	2.652	1.700	1.672	1.500	1.610	1.500	1.377	564.002	2.622
17	3.158	3.001	2.877	2.101	2.895	1.500	1.963	1.726	1.833	1.503	1.541	379.419	2.086
18	4.187	2.484	4.089	2.919	4.282	3.250	3.626	2.196	3.491	1.929	2.307	196.854	1.109
19	2.800	3.316	1.666	1.510	2.835	1.629	1.666	1.545	1.519	1.558	1.345	729.787	2.844
20	4.015	2.494	3.076	2.134	2.575	1.500	2.047	1.525	3.097	1.500	1.659	311.524	1.841
21	2.671	3.671	2.298	1.532	2.193	1.502	1.500	1.539	1.500	1.509	1.317	549.672	2.894
22	3.000	2.502	3.686	2.666	3.385	1.500	3.439	2.192	3.151	1.585	1.915	248.957	1.353
23	2.187	1.944	3.009	2.781	4.500	1.576	3.144	1.970	3.483	3.477	2.037	294.010	1.189
24	2.597	3.361	1.942	1.997	2.944	1.792	1.813	1.500	1.853	1.570	1.451	561.678	2.366
25	2.359	3.371	2.698	1.843	2.459	1.964	1.785	1.500	1.630	1.506	1.431	463.044	2.486
26	2.886	2.491	3.654	2.660	3.281	1.605	3.427	2.200	3.026	1.584	1.892	258.252	1.401
27	2.683	3.563	2.031	1.523	2.201	1.500	1.765	1.500	1.500	1.513	1.307	609.289	2.917
28	2.165	1.959	2.744	2.816	4.497	1.577	3.085	1.962	3.420	3.533	2.010	315.710	1.223
29	2.406	3.215	2.640	2.121	2.418	1.700	1.500	1.500	1.684	1.500	1.403	451.548	2.531
30	4.291	2.070	3.890	2.634	3.922	3.020	3.070	2.019	3.228	1.945	2.139	209.511	1.247

由图 5 可以看出,在车厢夹层板断面单位质量一致的情况下,各结构尺寸变量的分布更加合理,多目标优化得到的结构侧墙最大变形更小。在相同的车厢侧墙断面结构质量下,Pareto 解集中车厢结构的最大变形性能比拓扑结构的最大变形性能提高了 8.21%~33.58%。

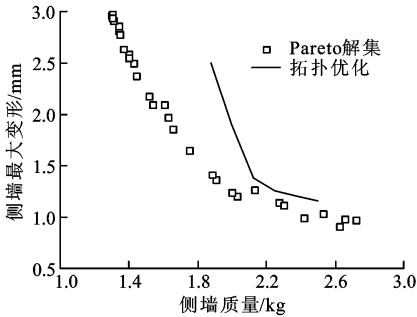


图 5 多目标优化的结构与拓扑优化结构性能的比较

表 1 中的解集不仅满足高速运行时的设计要求,而且可以满足其他运行速度下结构设计的要求。Pareto 解集为设计者提供了多种可供选择的方案,设计者可以根据具体的使用情况,并结合自己的经验,在 Pareto 解集中选择几组方案进行比较,以确定最终方案。表 2 为不同运行速度下,高速列车车厢侧墙的质量、刚度以及气压梯度的变化性能。当高速列车以低速(160~200 km/h)运行为主时,则追求较小的车厢质量,节省能源,可选择表 1 中质量较轻的第 3、5 和 27 组方案作为优先备选方案。当高速列车以高速运行(300~350 km/h)为主时,则需要较高的车厢结构刚度,以及比较小的气压变化梯度值,可选择第 1、6、8 等组方案作为备选方案。当高速列车以中速运行(200~300 km/h)为主时,则需要综合考虑各项性能指标,可选择 Pareto 解集中第 13、25、29 等组方案作为备选方案。

表 2 Pareto 解集中高速列车的侧墙性能

组	质量/kg	应变能/J	最大变形/mm	气压梯度/ $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$
3	1.299 2	214.047 1	1.087 3	88.709 3
5	1.309 0	177.047 6	0.941 4	88.580 3
27	1.307 5	216.140 9	1.088 6	88.110 0
1	2.662 4	152.169 7	0.968 9	122.586 4
6	2.726 6	157.442 4	0.952 8	119.775 8
8	2.540 1	173.263 4	1.014 4	122.274 3
13	1.401 5	139.523 0	0.812 7	211.650 1
25	1.430 8	131.288 1	0.788 9	194.581 0
29	1.402 8	127.462 3	0.785 8	226.067 8

3 结 论

在多目标优化 Pareto 解集中,采用本文提出的高速列车车厢夹层板侧墙断面结构的多目标优化设计方法,可使高速列车侧墙夹层板断面结构的最大变形性能比拓扑结构的最大变形性能提高 8.21%~33.58%。本文提出的多目标优化设计方法在拓扑优化技术的基础上,融合均匀超立方设计样本技术、代理模型技术和多目标遗传算法 NSGA-II,将车厢侧墙夹层板的质量、柔度、最大变形指标作为目标,以车厢侧墙的结构参数作为变量,选取影响高速列车车厢舒适性的车厢气压变化梯度作为约束函数,对高速列车车厢侧墙夹层板断面进行了多目标优化设计,求得了多目标优化解集,为高速列车车厢夹层板断面的设计提供了多种可供选择的方案。

参考文献:

[1] 李强,金新灿. 动车组设计 [M]. 北京:中国铁道,2008:245.

[2] 李铁,栾平景. 国内外客车总体设计标准对比研究 [J]. 国外铁道车辆,2006(5):36-39.
LI Tie, LUAN Pingjing. Comparison research on overall design standards for passenger cars in China and abroad [J]. Foreign Rolling Stock, 2006(5): 36-39.

[3] RAGHUNATHAN R S, KIM H D, SETOGUCHI T. Aerodynamics of high-speed railway train [J]. Progress in Aerospace Sciences, 2002, 38(6/7): 469-514.

[4] KIM N, PARK T. A study on the dynamic performance of the 200km/h Korean tilting train by means of roller rig test [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2009(4): 25-30.

[5] 李红霞,杨弘,李德才. 高速列车车体断面优化数值分析 [J]. 铁道车辆,2007(2):8-10.
LI Hongxia, YANG Hong, LI decai. Analysis of optimized values of the cross section of the carbody of high speed trains [J]. Rolling Stock, 2007(2): 8-10.

[6] LIAO X, LI Q, YANG X, et al. Multiobjective optimization for crash safety design of vehicles using stepwise regression model [J]. Struct Multidisc Optim, 2008(35): 561-569.

[7] BENDSOE M P, SIGMUND O. Topology optimization: theory, methods and applications [M]. Heidelberg, USA: Springer-Verlag, 2004: 370.

[8] JIN R, CHEN W. Comparative studies of metmodel-

ing techniques under multiple modeling criteria [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2000, 23(1): 1-13.

[9] BUTLER N A. Optimal and orthogonal Latin hypercube design for computer experiments [J]. Biometrika, 2001, 88(3): 847-857.

[10] DEB K, MEMBER A. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm NSGA-II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.

[11] 公茂果,焦李成,杨咚咚,等. 进化多目标优化算法研究 [J]. 软件学报, 2009, 20(2): 271-289.

GONG Maoguo, JIAO Licheng, YANG Dongdong, et al. Evolutionary multi-objective optimization algorithms [J]. Journal of Software, 2009, 20(2): 271-289.

[12] 李人宪,赵晶,刘杰,等. 高速列车会车压力波对侧窗的影响 [J]. 机械工程学报, 2010(4): 87-92.

LI Renxian, ZHAO Jing, LIU Jie, et al. Influence of air pressure pulse on side windows of high-speed trains passing each other [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010(4): 87-92.

[13] 苏晓峰,程建峰,韩增盛. 高速列车气密性研究综述 [J]. 铁道车辆, 2004, 42(5): 16-19.

SU Xiaofeng, CHENG Jianfeng, HAN Zengsheng. Review on air tightness of high-speed trains [J]. Rolling Stock, 2004, 42(5): 16-19.

(编辑 管咏梅)

(上接第 51 页)

(1)BOG 压缩机在稳定运行时气缸温度远低于常温,气缸吸排气腔平均温度分别达 $-97\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-21\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。周期性非稳态温度场在达到动态稳定时的波动小于 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,稳定后气缸温度场可认为是不变的。

(2)BOG 压缩机常温启动后,初始时气缸温度下降较快,气缸内外壁温度下降有所不同,这使得气缸温度剧烈变化且内部温差较大,内外壁最大温差达 $87.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,导致气缸内产生较大的热应力。

(3)BOG 压缩机采用预冷方式启动可以明显减小气缸内部温差,当预冷至 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,气缸内外壁最大温差仅为 $53.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,相比常温启动时下降了 38.6% 。

参考文献:

[1] 顾安忠. 液化天然气技术 [M]. 北京:机械工业出版社, 2003.

[2] 刘浩,金国强. LNG 接收站 BOG 气体处理工艺 [J]. 化工设计, 2006, 16(1): 13-16.

LIU Hao, JIN Guoqiang. Process comparison and energy saving analysis of BOG gas treatment of LNG receiving terminal [J]. Chemical Engineering Design, 2006, 16(1): 13-16.

[3] 尹清党. BOG 压缩机在 LNG 接收站的应用 [J]. 压缩机技术, 2009 (9): 35-39.

YIN Qingdang. Application of BOG compressor in LNG terminal [J]. Compressor Technology, 2009 (9): 35-39.

[4] 吕俊,张昌维,傅皓. LNG 接收站 BOG 压缩机处理能力计算及选型研究 [J]. 化工设计, 2011, 21(1): 14-16.

LU Jun, ZHANG Changwei, FU Hao. Study on processing capacity calculation and type selection of BOG compressor in LNG terminal [J]. Chemical Engineering Design, 2011, 21(1): 14-16.

[5] 丁仕风,唐文勇,张圣坤. 大型液化天然气船温度场及温度应力研究 [J]. 船舶工程, 2008(5): 16-19.

DING Shifeng, TANG Wenyong, ZHANG Shengkun. A research on temperature field and stress field of large-scale LNG ship [J]. Ship Engineering, 2008(5): 16-19.

[6] MURAI K, NAGURA K. LNG boil-off gas reciprocating compressors [J]. Kobe Steel Works Engineering Reports, 1999, 49(1): 64-67.

[7] 杨世铭,陶文铨. 传热学 [M]. 4 版. 北京:高等教育出版社, 2006.

[8] 杨杰. DME 发动机活塞温度场的三维有限元分析与试验研究 [D]. 武汉:华中科技大学, 2007.

[9] 丁大伟. 缸盖温度场的数值模拟及试验研究 [D]. 济南:山东大学, 2009.

[10] 中石油唐山液化天然气项目经理部. 液化天然气 (LNG)接收站重要设备材料手册 [M]. 北京:石油工业出版社, 2007.

(编辑 苗凌)