

文章编号:1007-4708(2009)03-0385-05

大功率电力机车车体与变压器 关键部位强度计算及设计

张昭^{*1}, 谷思生¹, 王明杰², 王永良², 王松², 唐伟²,
朱丹², 吴敬凯¹, 方杰¹, 江山¹, 戴磊¹, 亢战¹, 吴昌华¹

(1. 大连理工大学 运载工程与力学学部 工程力学系 工业装备结构分析国家重点实验室, 大连 116024;
2. 中国北车集团 大连机车车辆有限公司, 大连 116022)

摘要:采用有限元方法对世界最大功率货运电力机车的车体和变压器关键部件强度进行了计算,车体结构用壳元和空间梁单元进行模拟,对作为支撑的高圆簧用刚度等效的圆柱薄壳进行模拟,并根据计算结果以及拓扑优化结果对车体关键受力部位进行了重新设计,设计之后的车体结构基本满足相关要求。车体计算模型共划分了约34万个节点,自由度总数超过200万。对主变压器的关键受力部件进行了进一步计算,变压器拉螺杆使用3节点轴对称单元、吊装螺栓使用四面体单元进行模拟。结果显示,对于拉螺杆以及厚薄螺母的接触,第一匝接触螺纹的应力最高,而后每一匝螺纹上的应力逐渐降低。吊装工况下变压器高应力区域主要发生在吊装螺栓附近,且同一安装座上的吊装螺栓应力分布是不同的。

关键词:机车设计;拓扑优化;有限元

中图分类号:O342;U260.2 **文献标识码:**A

1 引言

随着我国经济的快速发展,采用大功率高速机车以进一步增强铁路运输能力已经成为必然。根据铁道部的要求,大连机车车辆有限公司与大连理工大学工程力学系合作开发目前世界上功率最大的多轴货运机车,设计时速为120 km/h,该型机车的成功设计和生产必将大大推动我国铁路运输能力的进一步提高。

目前,针对机车的有限元计算主要包括车体结构设计^[1],电力机车主变压器设计^[2],机车转向架设计^[3],牵引齿轮系统设计^[4],机车模态分析^[5]以及机车发动机关键零部件^[6],疲劳设计^[7]等。这些有限元计算为机车的合理设计提供了一定的依据和参考。

与上述工作不同,本项目针对目前世界上最大功率多轴货运机车进行有限元计算,车体计算模型共划分了约34万个节点,自由度总数超过200万,首次在机车设计中使用了拓扑优化的设计概念进

行车体结构的设计,并采用接触计算的方法对拉螺杆以及吊装螺栓的强度进行了计算和校核。

2 模型描述

机车车体初始设计模型如图1所示。车体初始设计模型采用板、梁结构单元,共包含91,605个节点和77,964个单元。

由于压缩工况下车体承受3,000 kN的压缩力,是车体所有工况中最恶劣的,因此,必须首先对压缩工况下的机车车体进行计算,并从中找出不足,从而根据相关计算结果和拓扑优化结果对车体结构进行进一步设计和改进和更为细致的分析,修

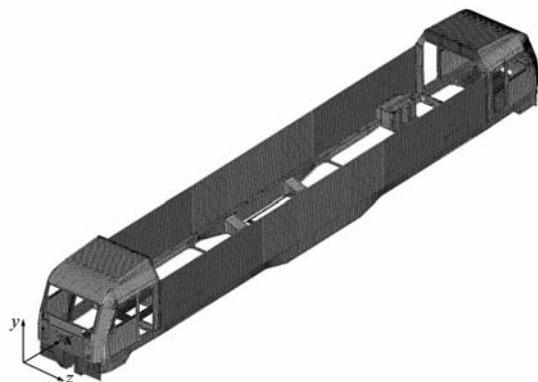


图1 机车车体初始设计模型

Fig. 1 Initial geometry design of the locomotive body

收稿日期:2008-08-08;修改稿收到日期:2008-10-23.

基金项目:国家自然科学基金(10802017);国家高技术研究发展计划资助(2006AA09 Z326);大连理工大学理学学科研究基金资助项目.

作者简介:张昭*(1979-),男,博士,讲师
(E-mail:zhangz@dlut.edu.cn).

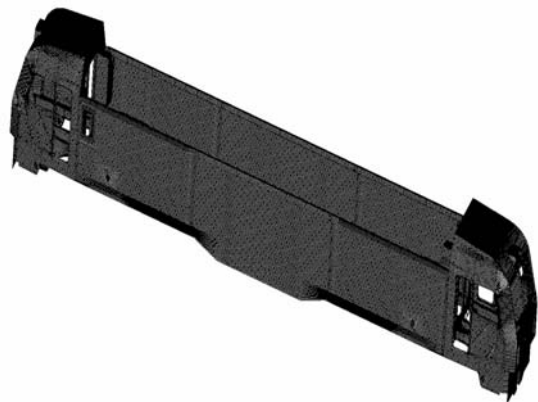


图 2 机车车体改进模型
Fig. 2 Modified version of the locomotive body

改后模型依然采用板梁结构单元,但是单元密度较初始设计大大增加,包含 367,677 个节点和 379,373 个单元,如图 2 所示。

高圆簧位于旁承内部,采用圆柱刚度等效的方法将高圆簧等效为圆柱壳,从而可以使用壳单元模拟高圆簧,为车体计算主要约束部位。刚度等效方法如下:

弹簧变形:

$$\Delta l = \frac{4PR^3n}{Gr^4} \quad (1)$$

式中 P 为弹簧所承受的压力, R 为弹簧中径, r 为弹簧丝的半径, n 为匝数, G 为剪切弹性模量。

对于弹性范围内的等效圆柱壳:

$$\Delta l = \frac{Pl}{EA} \quad (2)$$

式中 l 为圆柱壳的长度, A 为圆柱壳的横截面积, E 为弹性模量。

由此可以得到小变形条件下的刚度等效公式:

$$\frac{l}{A} = \frac{4ER^3n}{Gr^4} \quad (3)$$

对车体强度的计算和拓扑优化采用 ANSYS 完成。

主变压器是机车车体的关键受力部件,而主变压器中最关注的部位在于拉螺杆螺纹接触和吊装螺栓强度,主变压器强度问题往往出现在吊装螺栓上。本文采用有限元方法对吊装螺栓的螺纹接触问题进行计算,以确定螺纹接触问题应力分布的规律,模型如图 3 所示。摩擦接触问题属于典型的非线性问题,对接触问题的求解有多种方法^[8-10],本

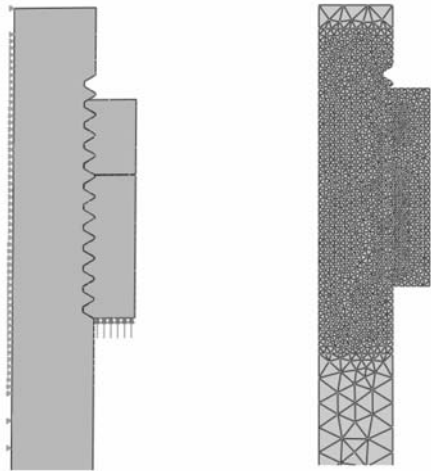


图 3 主变压器拉螺杆几何模型和网格
Fig. 3 Geometry and mesh of the screw bolt of the main transformer

文采用惩罚函数法进行求解,摩擦系数取为 0.1。

对拉螺杆和吊装螺栓的接触计算采用有限元程序 ABAQUS 完成。

3 结果与讨论

3.1 车体计算

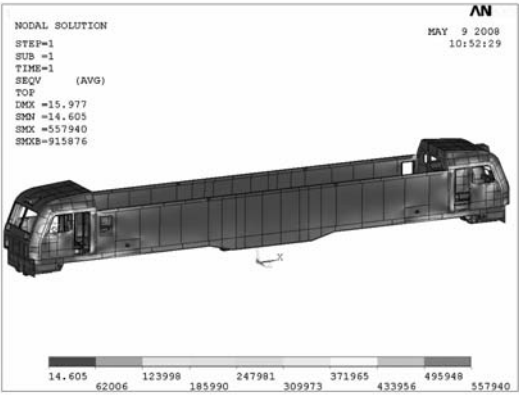
初始设计模型在压缩工况下应力相对较高,达到 558 MPa;另外,车门车窗角上的应力均比较高,如图 4 所示。

为了降低车体结构的应力水平,对车体结构进行了拓扑优化,得到的拓扑结构如图 5 所示,因此,可以由此推断,车体结构车窗下面应使用斜撑结构,并尽量使斜撑加强肋的方向与拓扑优化得到的结构方向一致,接近 45°。

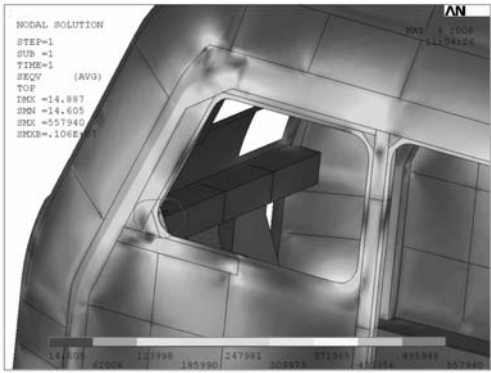
根据拓扑优化后的结果对车体结构进行修改,可以发现这一修改可以使车体应力分布更为合理,如图 6 所示,此时车体结构的最大应力发生在车门前上角处。

3.2 主变压器计算

主变压器拉螺杆的受力如图 7 所示,最大应力产生在第一匝螺纹接触部位,为 294 MPa,其后每一匝螺纹应力逐渐降低,直到厚薄螺母的连接处。在厚薄螺母的连接处,应力稍微增加,然后按照同样的规律继续下降。对于厚螺母靠近受力部位,第二匝螺纹应力较第一匝螺纹下降大约 40%,而对于薄螺母,不同匝螺纹应力的差异远没有厚螺母



(a) 车体应力分布



(b) 车窗应力分布

图 4 初始设计模型压缩工况计算结果

Fig. 4 Computational result of the initial design model in compression load case

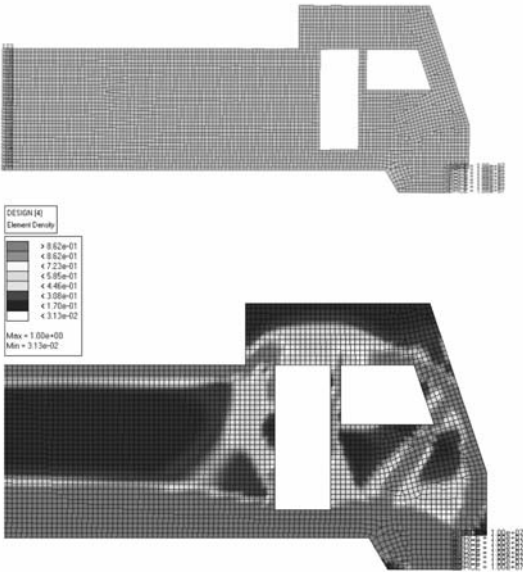


图 5 车体结构在压缩力作用下的拓扑优化

Fig. 5 Topological optimization of the locomotive body in compression forces

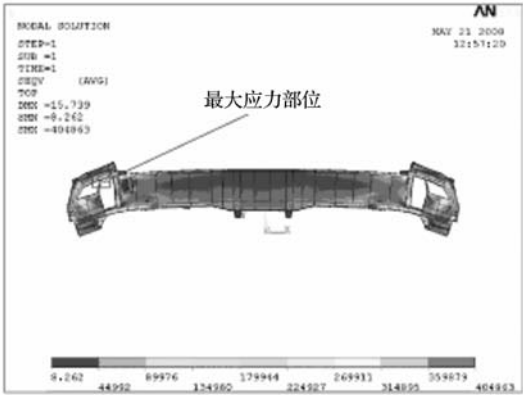


图 6 机车车体改进模型压缩工况计算结果

Fig. 6 Computational result of the modified locomotive model in compression load case

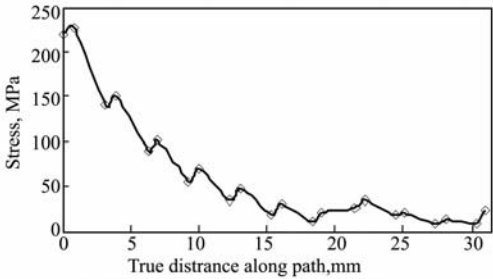


图 8 应力随匝数的变化

Fig. 8 Variation of stress with screw coils

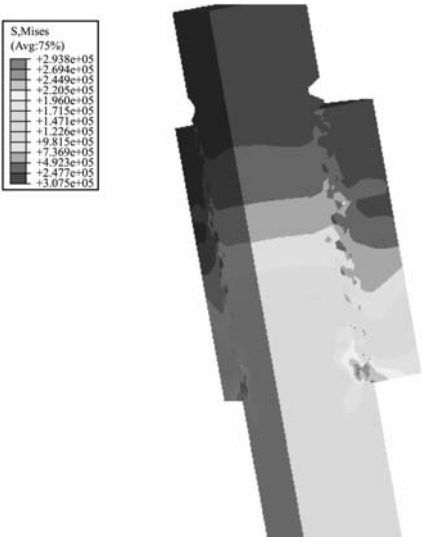


图 7 拉螺杆应力分布

Fig. 7 Stress distribution of screw bolt

高,如图 8 所示(应力变化趋势发生改变的部位为厚薄螺母的连接处)。

主变压器与变压器梁通过吊装螺栓连接,吊装工况中不考虑外部大气压力,主要考虑油重、夹件和铁芯重量以及电抗器重量等。吊装工况下最大应力发生在吊装螺栓附近,如图 9 所示,与之相比,变压器梁和主变压器其他部分的应力相对较低,最大应力发生在吊装螺栓根部,且同一安装座上的四

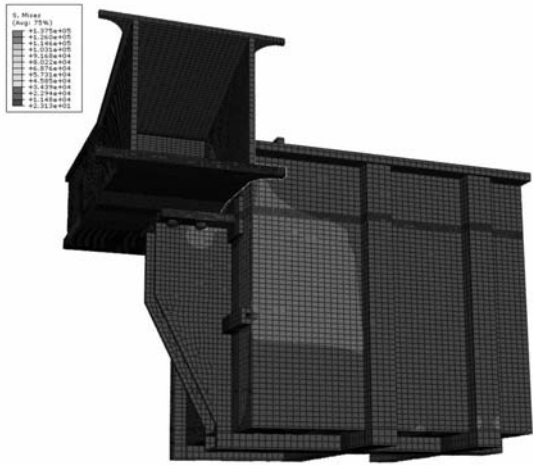


图 9 主变压器与变压器梁的螺栓连接
Fig. 9 Bolt joint of the main transformer and transformer beam

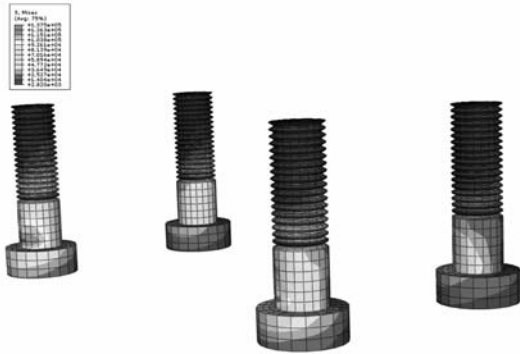


图 10 吊装螺栓应力分布
Fig. 10 Stress distribution on the suspension bolts

根吊装螺栓的应力分布是不同的,如图 10 所示,由此可以看出,吊装螺栓满足静强度的要求。

4 结 论

- (1) 机车车窗附近应该尽量采用斜撑结构,并与拓扑结构得到的传力路径尽量吻合。
- (2) 压缩工况下,车体结构的最大应力一般均发生在车门角或者车窗角。
- (3) 对于螺钉螺母接触,与受力部位接近的第一匝螺纹处的应力最高,与该处应力相比,第二匝螺纹应力会下降 40%左右,并随着远离载荷作用点,每一匝螺纹的应力逐渐降低。

致谢:在机车设计和本文的完成过程中,作者得到了大连理工大学工程力学系张洪武教授和程耿东院士的指导,在此对他们的辛勤工作和帮助表示感谢。

参考文献(References):

[1] 刘晓波. 基于 ANSYS 的机车车体结构有限元计算模板的研究与应用[J]. 内燃机车, 2008, **407**: 23-28. (LIU Xiao-bo. Application and study of ANSYS-based FEA-Template for locomotive car body[J]. Diesel Locomotive, 2008, **407**: 23-28. (in Chinese))

[2] 李季, 罗隆福, 许加柱. 电力机车主变压器油箱三维温度场有限元分析[J]. 高电压技术, 2005, **31**(8): 21-23. (LI Ji, LUO Long-fu, XU Jia-zhu. Finite element analysis of the 3d thermal field of main transformer oil tank of electric locomotive[J]. High Voltage Engineering, 2005, **31**(8): 21-23. (in Chinese))

[3] 李涛, 肖守纳, 陈喜红, 等. 基于 APDL 的高速电力机车转向架构架有限元优化[J]. 机车电传动, 2007, **2**: 16-20. (LI Tao, XIAO Shou-na, CHEN Xi-hong, et al. Finite element optimization on bogie frame based on APDL for high speed electric locomotive[J]. Electric Drive for Locomotives, 2007, **2**: 16-20. (in Chinese))

[4] 佟维, 吴昌华. SS.7 型电力机车牵引齿轮系统的有限元三维接触分析[J]. 机车电传动, 1999, **6**: 11-13. (TONG Wei, WU Chang-hua. A finite element 3D contact analysis on tractive gear system for SS_7 electric locomotive[J]. Electric Drive for Locomotive, 1999, **6**: 11-13. (in Chinese))

[5] CHAAR N, BERG M. Vehicle-track dynamic simulations of a locomotive considering wheelset structural flexibility and comparison with measurements[A]. Proc IMechE Part F[C]. J Rail and Rapid Transit, 2005, **219**: 225-238.

[6] 吴昌华. 有限元法在机车发动机主要零部件设计中的应用[J]. 内燃机工程, 1993, **14**(2): 56-60. (WU Chang-hua. Application of FEM to major parts design in locomotive diesel engine[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 1993, **14**(2): 56-60. (in Chinese))

[7] 王超, 许平, 何华. 机车辅助变流器柜基于有限元的疲劳分析[J]. 内燃机车, 2007, **403**: 14-18. (WANG Chao, XU Ping, HE Hua. Finite Element Method based fatigue analysis of locomotive auxiliary

converter cabinet[J]. *Diesel Locomotives*, 2007, **403**: 14-18. (in Chinese))

[8] 张洪武,廖爱华,张 昭,等. 具有界面热阻的接触传热耦合问题的数值模拟[J]. 机械强度, 2004, **26**(4): 393-399. (ZHANG Hong-wu, LIAO Ai-hua, ZHANG Zhao, et al. Numerical simulation for heat transfer and contact problems with a thermal resistant constitutive model [J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2004, **26**(4): 393-399. (in Chinese))

[9] 张洪武,钟万勰,顾元宪. 三维弹塑性有摩擦接触问题求解的一个新算法[J]. 应用数学与力学, 2001, **22**(7): 673-681. (ZHANG Hong-wu, ZHONG Wan-xie, GU Yuan-xian. A new method for solution of 3D elastic-plastic frictional contact problems[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2001, **22**(7): 673-681. (in Chinese))

[10] ZHANG H W, ZHONG W X, WU C H, et al. Some advances and applications in quadratic programming method for numerical modeling of elastoplastic contact problems[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2006, **48**(2): 176-189.

Design and strength calculation of key components of main transformer and body of high-power electric locomotive

ZHANG Zhao^{*1}, GU Si-sheng¹, WANG Ming-jie², WANG Yong-liang², WANG Song², TANG Wei², ZHU Dan², WU Jing-kai¹, FANG Jie¹, JIANG Shan¹, DAI Lei¹, KANG Zhan¹, WU Chang-hua¹

- (1. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment,
Department of Engineering Mechanics, Faculty of Vehicle Engineering and Mechanics,
Dalian University of Technology, Dalian 116024, China
2. China Beiche Group Dalian Locomotive and Rolling Stock Works, Dalian 116022, China)

Abstract: Finite element method was used for the strength calculations of the key components of the main transformer and the locomotive body of the high-power electric locomotive. Shell and beam elements are used for the numerical modeling of the locomotive body. Cylindrical shell was used to simulate the behaviors of the spring by using stiffness equivalence method. According to the computational results and the results of the topological optimization, the key components of the locomotive body were re-designed to satisfy the strength of the locomotive structure. The whole model of the locomotive consists of more than 340,000 nodes and the freedom degrees are more than 2,000,000. The further computation on the main transformer, in which 3 nodes axis-symmetric elements are used for the screw bolts and tetrahedral elements are used for the suspension bolts, showed that the stress on the first coil of the bolt is the highest. The stress gradually decreases when the location becomes far from the first coil of the screw bolt. In the suspension load case, the high stresses on the transformer occur near the suspension bolts and the stresses of the four bolts on the same installation block are different.

Key words: locomotive design; topological optimization; finite element