

齿轨系统齿轮箱箱体静强度和疲劳仿真分析

张会杰 秦庆斌
(中车青岛四方机车车辆股份有限公司 山东 青岛 266000)

摘要: 本文对齿轨列车某种齿轮箱箱体的静强度和疲劳仿真进行了分析,对常用疲劳工况下的静强度和疲劳破坏风险进行了分析,还对电机短路的极限工况进行了分析,计算了在极限工况下的零件最大应力和安全系数,较为全面地对齿轨列车的齿轮箱箱体静强度和疲劳风险进行了评估。

关键词: 齿轨列车; 齿轮箱箱体; 静强度分析; 疲劳仿真分析

1 研究背景

齿轨铁路(Rack Railway)是一种历史悠久的轨道交通制式,主要服务于山地景区观光,在国外广泛应用于山区轨道交通和山地景区观光。目前我国已建成的齿轨线路达 180 条,运营总里程超过 3000km。与普通轮轨黏着系统相比,其通过齿轮齿条啮合补充轮轨黏着的不足或直接使用齿轮齿条啮合驱动,使得齿轨列车的最大爬坡坡度超过 200%^[1]。齿轨列车的概念于 1811 年在英国被提出,并在 1869 年在美国建成了世界上第一条齿轨铁路。我国同样具有众多山地区域,但限于轨道行业的起步时间比较晚造成尚未有成熟的轨道列车客运的经验,齿轨列车在我国并没有推广应用^[2,3]。

相较于传统列车由轴箱传递到车轴,再通过车轮-轮轨进行输出不同,齿轨列车的动力是通过走行齿轮和齿轨啮合输出的。动力输出点的改变带来了齿轨列车爬坡能力的提升,同时也给齿轮箱带来了更大的负荷。一旦齿轮箱强度不达标将引发车辆失去动力的问题,如果车辆在坡道处发生这样的问题将进一步引发车辆沿着坡道滑下,从而导致极大的安全事故^[3]。因此,对齿轨列车车辆的齿轮箱强度分析是确保齿轨列车能够安全运行的重点。

2 仿真参数设置

2.1 车辆基本参数

齿轨系统总构成见图 1,其中齿轮箱箱体是本文中关注的结构。

2.2 载荷即材料参数

基于现有的齿轨技术要求^[4-6],仿真中使用的材料及载荷如表 1、表 2 所示。

2.3 仿真工况说明

(1) 常用工况疲劳校核^[7-9]:电机常用正转启动及反转启动(F类);齿轨正

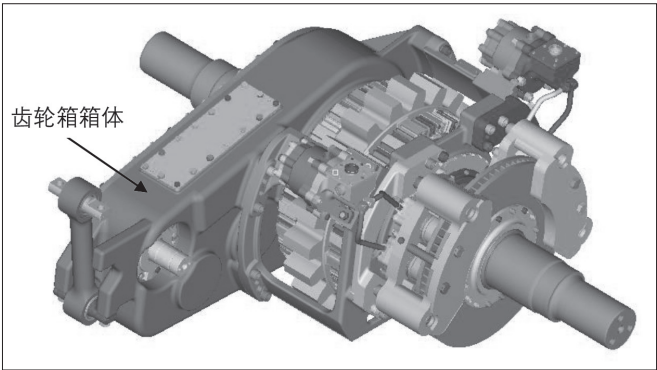


图 1 齿轨系统总成结构

转启动和反转启动工况最大扭矩约为 1400Nm。其中正转启动为工况 F1、反转启动为工况 F2;

(2) 极限工况强度校核^[7-9]:电机转矩短路工况(P类);电机正转短路和反转短路转矩 6000Nm。其中电机正转短路为工况 P1、反转短路为工况 P2。

2.4 建模分析标准

首先将通过有限元软件进行材料的应力幅值分布计算,通过该仿真可以得到箱体最容易受到疲劳破坏的点,然后将进行静力分析,通过有限元仿真得到箱体在受静力的情况下受力最大的点,最后将计算得到整个箱体的

表 1 载荷输入

载荷名称	垂向载荷大小	横向载荷大小	纵向载荷大小
轮对位置疲劳载荷 $N > 10^7$	垂向 $\pm 25g$	横向 $\pm 5g$	纵向 $\pm 5g$
轮对位置最大冲击载荷	垂向 $\pm 70g$	横向 $\pm 10g$	纵向 $\pm 10g$
电机最大启动转矩	1400Nm	电机短路转矩	6000Nm

表 2 材料输入

材料牌号	使用零件	密度 / (t/mm^3)	弹性模量 /MPa	泊松比	屈服强度 / MPa	抗拉强度 /MPa
QT400-18L	箱体、支撑架	7.85E-09	169000	0.275	≥ 240	≥ 400

疲劳安全系数,通过疲劳安全系数图可以直观地表现出来。同时,材料的 Haigh 图也将被绘制出来。通过该图可以更加直观地看出材料的疲劳破坏风险^[10]。

材料的安全系数可以通过三种定义计算:

Gerber Line :

$$\left(\frac{n\sigma_m}{\sigma_b}\right)^2 + \frac{n\sigma_a}{\sigma_w} = 1$$

Goodman Line :

$$\frac{\sigma_m}{\sigma_b} + \frac{\sigma_a}{\sigma_w} = \frac{1}{n}$$

Soderberg Line :

$$\frac{\sigma_m}{\sigma_y} + \frac{\sigma_a}{\sigma_w} = \frac{1}{n}$$

这三种定义在平均应力-应力幅图上的形式如图 2 所示。

3 QT400 材料分析结果

由于齿轨系统整体模型复杂,考虑到计算精度和计

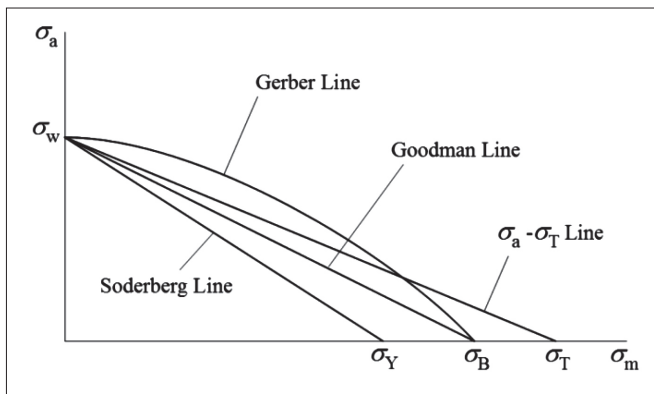


图 2 三种安全系数确定方法在平均应力-应力幅上的展现形式

算效率,本文中将齿轮箱箱体作为一个单独的系统并根据实际齿轨列车齿轮箱箱体结构构建,并完成了模型的网格绘制。

3.1 常见正反转启动工况静力及疲劳分析结果

通过将计算得出的正反转启动工况的受力数据输入进有限元仿真软件后,可以得到图 3 所示的材料应力幅值和平均应力分布云图。

由图 3 (a) 可知,QT400 材料最大应力幅值为 62.9MPa,同时,由图 3 (b) 可知 QT400 材料最大平均应力为 41.3MPa,最小平均应力 -21.3MPa。

由图 4 可以看出,QT400 材料疲劳安全系数 1.68,同时测试过程中各节点在 Haigh 曲线内,说明 QT400 材料零件在常用工况下发生疲劳破坏风险小。

3.2 正转及反转电机转矩短路工况分析结果

由图 5 可知,QT400 材料在齿轨系统电机转矩短路正转工况中的最大应力为 206.1MPa,在齿轨系统电机转矩短路反转工况中 QT400 材料最大应力 180.4MPa。

4 结语

通过分析和仿真计算,可以得出以下结论:采用 QT400 材料的齿轮箱体在常用工况时的平均应力-应力幅曲线在 Haigh 曲线区间内,证明其抗疲劳性能优秀;在极限工况,即正反转电机转矩短路工况中,其安全系数也能够分别保持在 1.16 和 1.33,有较高的安全余量。因此,该设计可以作为合格的齿轨系统齿轮箱。

参考文献:

- [1] 沈健. 山地齿轨旅游交通系统技术及应用研究 [J]. 机械工程与自动化, 2020 (4): 222-224.

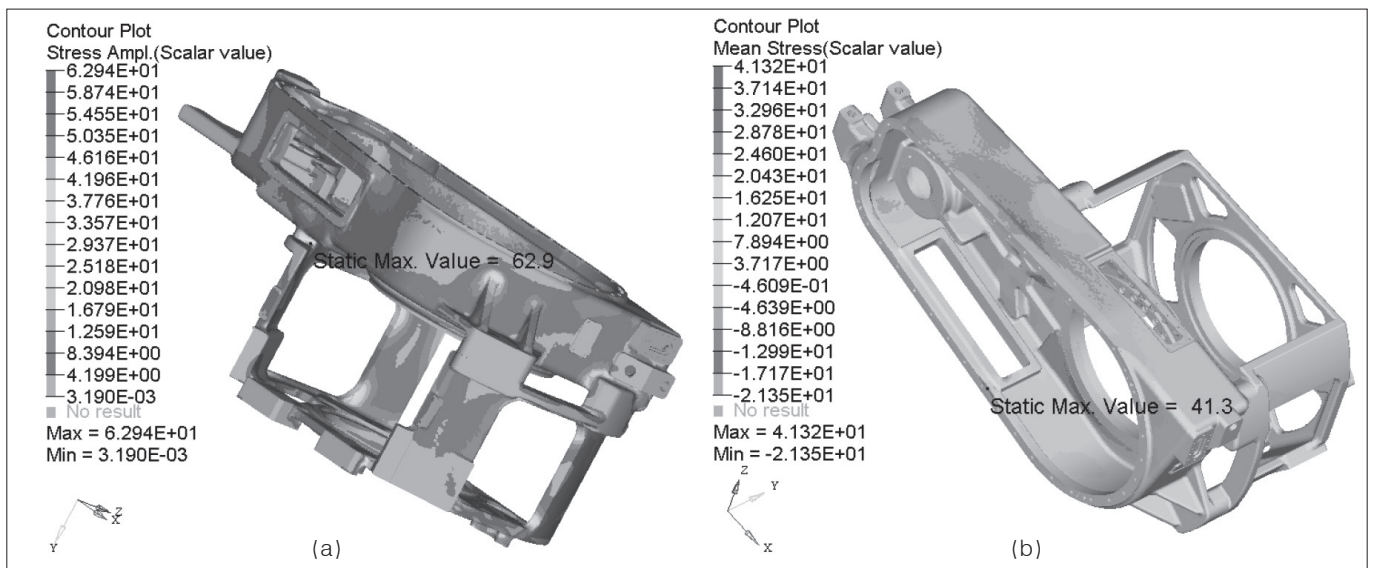


图 3 QT400 材料应力幅值 (左)、平均应力 (右) 分布云图

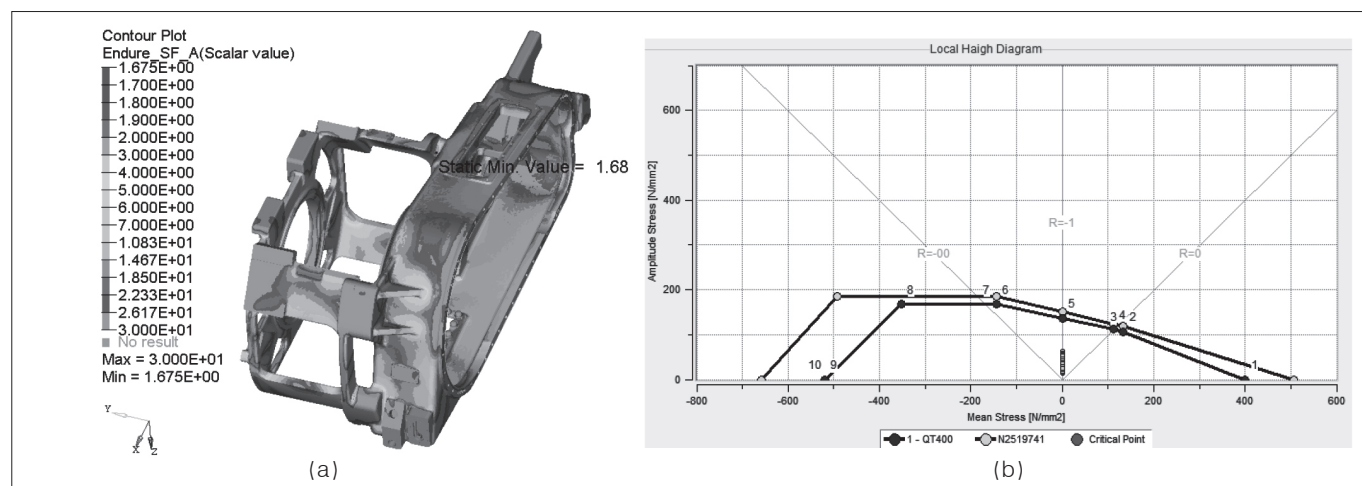


图4 QT400材料疲劳安全系数图 (a) Haigh图 (b)

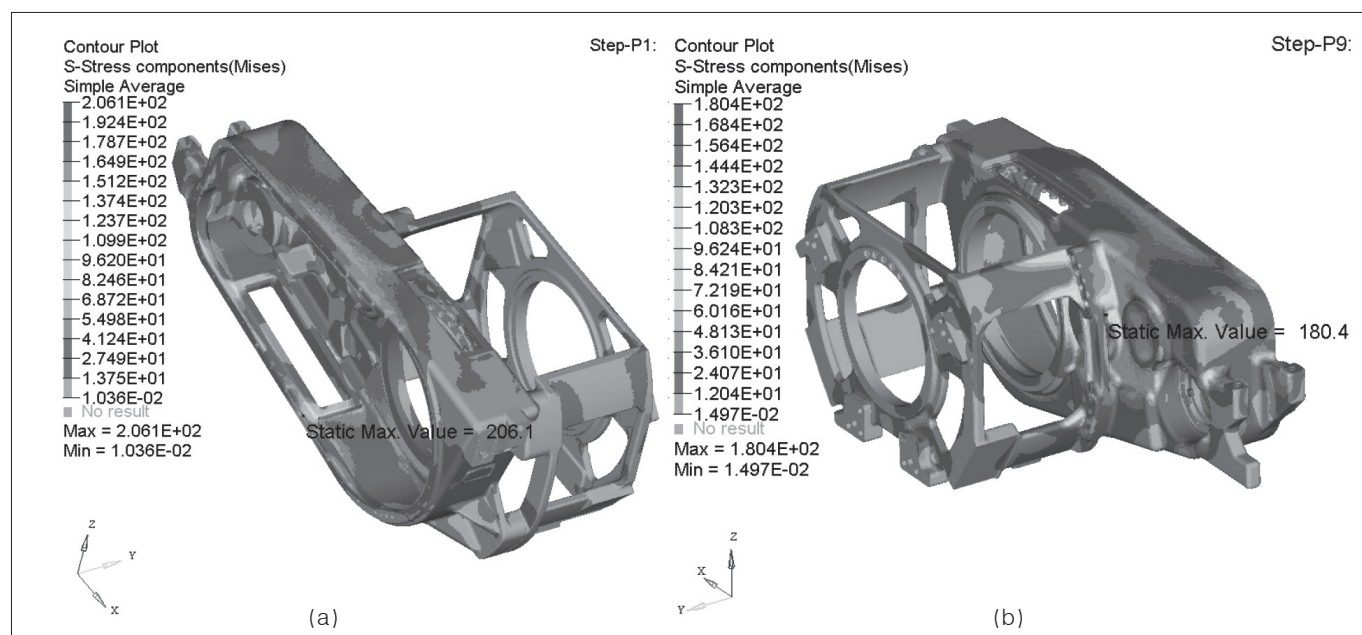


图5 齿轨系统短路正转及反转工况应力图

- [2] 潘相楠, 唐岚, 寇峻瑜, 等. 山地齿轨铁路发展现状及国内应用前景研究[J]. 黑龙江科学, 2020, 11(4): 10-14.
- [3] 王争鸣. 复杂山区铁路选线思路及理念[J]. 铁道工程学报 2016, 33(10): 5-9.
- [4] 王月新. 基于机载LiDAR技术的现代齿轨铁路线路设计方法研究[J]. 铁道标准设计, 2021, 65(3): 77-81.
- [5] 蔡向辉, 张乾, 贺天龙. 张家界七星山齿轨铁路轨道技术研究[J]. 铁道标准设计, 2020(7): 76-81.
- [6] 尚勤, 李廉枫, 涂旭. 国外齿轨铁路技术的发展及运用[J]. 机车电传动, 2019(2): 9-15.
- [7] 陈再刚, 唐亮, 杨吉忠, 等. 齿轨铁路导入装置动力学特性[J]. 交通运输工程学报, 2022(1): 122-131.

- [8] 杜文博, 苏成光, 韩笑东, 等. 齿轨铁路联结部件受力分析及纵向阻力研究[J]. 铁道标准设计, 2022(7): 1-5.
- [9] 孙友. 基于本体性能的动车组铸铝齿轮箱体静强度评估方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
- [10] 王起梁, 党刚, 孟永帅, 等. 轨道交通车辆驱动齿轮箱静强度仿真模板开发[J]. 机车车辆工艺, 2016(5): 41-42.

作者简介: 张会杰(1984.04-), 男, 汉族, 山东聊城人, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向: 城轨转向架设计与研发; 秦庆斌(1990.12-), 男, 汉族, 山东泰安人, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 城轨转向架设计与研发。