

基于 Romax 刚柔耦合模型的隧道牵引 机车用车轴齿轮箱设计

廉振红¹, 杨仲磊²

(1. 郑州职业技术学院 汽车工程系, 河南 郑州 450121;

2. 郑州机械研究所, 河南 郑州 450052)

摘要: 以齿轮传动分析软件 Romax 为建模平台, 借助三维软件 Inventor 和有限元前处理软件 Hypermesh, 建立了包含柔性车轴和柔性箱体在内的隧道牵引机车用车轴齿轮箱的刚柔耦合模型。在综合考虑柔性体变形、轴承间隙和齿轮啮合错位的基础上, 依据载荷谱进行了齿轮修形设计、齿轮疲劳强度、轴承寿命和箱体静强度及模态的校核计算。计算结果和实际运行情况表明, 该刚柔耦合模型用于车轴齿轮箱的设计开发是可行的。

关键词: 牵引机车; 车轴齿轮箱; Romax; 刚柔耦合; 齿轮修形; 模态

中图分类号: U260.9⁺5; TH132.46; U262.3

文献标识码: A

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2017.03.010

Design of Axle Gear Case in Tunnel Traction Locomotive Based on Rigid-flexible Coupling Model by Using Romax

LIAN Zhenhong¹, YANG Zhonglei²

(1. Department of Automotive Engineering, Zhengzhou Technical College, Zhengzhou, Henan 450121, China;

2. Zhengzhou Research Institute of Mechanical Engineering, Zhengzhou, Henan 450052, China)

Abstract: The rigid-flexible coupling model of axle gear case in tunnel traction locomotive which included the flexible axle and case body was established using Romax, Inventor and Hypermesh software. Tooth profile modification, gear-tooth fatigue strength, bearing life, and the static strength and modal of case body were calculated and analyzed by applying load spectrum to the rigid-flexible coupling model, in which the effects of the flexible deflection, bearing clearance and misalignments were detected and considered. The calculation results and actual practice showed that the rigid-flexible coupling model of axle gear case could be used for developing the product in the design work.

Keywords: traction locomotive; axle gear case; Romax; rigid-flexible coupling; tooth profile modification; modal

0 引言

隧道牵引机车通常用于长大隧道施工有轨运输, 传动系统主要由柴油发动机、液力变矩器、变速箱和车轴齿轮箱等组成。车轴齿轮箱作为牵引机车传动系统中的关键部件, 其性能直接影响着整车的性能和隧道施工的进度。

目前, 采用刚柔耦合模型进行齿轮箱的设计日渐

成为热门研究课题^[1-3]。作为在有限元理论和多体动力学理论上发展起来的刚柔耦合多体动力学, 相比传统经典的多刚体动力学更能接近真实地反映出系统的实际工作状态。但当前所采用的齿轮箱刚柔耦合模型主要存在以下问题^[4-7]: ①轴承强度和寿命的计算: 由于将轴承简化为刚度系数 K 和阻尼系数 C 引入到模型中或等效为旋转副, 模型中缺少专业轴承数据, 因此难以对轴承强度和寿命进行直接准确的计算; ②齿轮拓扑优化: 对诸如微观修形曲线和宏观轮齿参数改

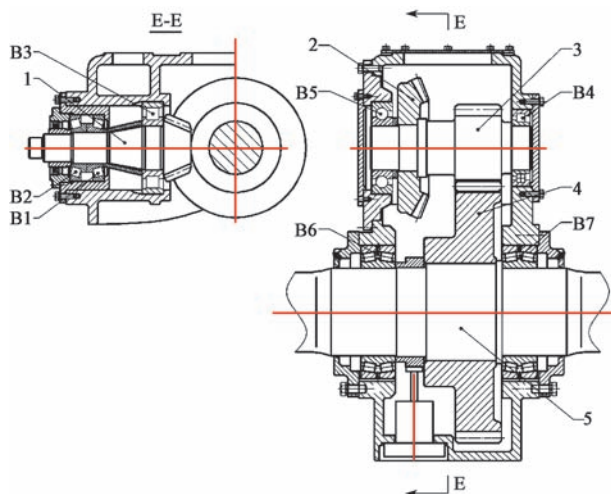
动后，仍需要重新进行一次刚柔耦合模型的建模，即通过三维建模软件和有限元前处理中生成改进后的柔性体文件，再导入到多体动力学软件中进行计算，由于需要在不同软件平台间反复切换和操作，因此较难实现齿轮拓扑优化。

本文使用齿轮传动分析软件 Romax 作为建模平台，同时借助三维软件 Inventor 和有限元前处理软件 HyperMesh 建立车轴齿轮箱的刚柔耦合模型，并进行计算分析，得到了合理的车轴齿轮箱设计方案。

1 车轴齿轮箱简介

1) 车轴齿轮箱的结构

车轴齿轮箱为锥齿轮副 + 圆柱齿轮副的两级减速结构，如图 1 所示。润滑方式：上侧传动部件由车轴偏心套驱动内置轴向柱塞泵的强制润滑，下侧传动部件为油池润滑。齿轮箱具有布局合理、结构紧凑、体积小和重量轻等优点。



1—输入锥齿轮轴；2—大锥齿轮；3—中间齿轮轴；4—大齿轮；5—车轴；B1、B2、B3—输入轴轴承；B4、B5—中间轴轴承；B6、B7—车轴轴承

图 1 车轴齿轮箱结构图

2) 车轴齿轮箱技术参数

轴重	17.5 t
轮径	0.85 m
功率	108 kW
最高输入转速	2 500 r/min
锥齿轮副速比	2.333
圆柱齿轮副速比	3.267
总速比	7.622

3) 主要零部件的选材和加工工艺

由于车轴齿轮箱直接承受着来自轨道对轮对的冲击，工作条件恶劣^[8]，因此箱体的材质选用高强度且良好韧性的 ZG230-450；车轴齿轮箱的一级锥齿轮副采用格利森制式，二级圆柱齿轮副采用直齿渐开线制式，材料均使用 17CrNiMo6，制造采用渗碳淬火、磨齿工艺。

2 车轴齿轮箱的刚柔耦合模型

Romax 软件作为一种虚拟产品开发和分析的多体动力学仿真平台，主要用于齿轮传动系统的设计与分析，可进行可视化三维建模、概念设计、强度、寿命、有限元仿真、运动仿真和振动噪声（NVH）等方面的计算分析。软件的优势在于，可在同一环境中对所有部件进行评估分析，方便地将系统内各部件的耦合作用考虑在内；模型为参数化建模，易于修改，从而有效缩短了设计开发周期。

1) 传动系统的主要建模步骤

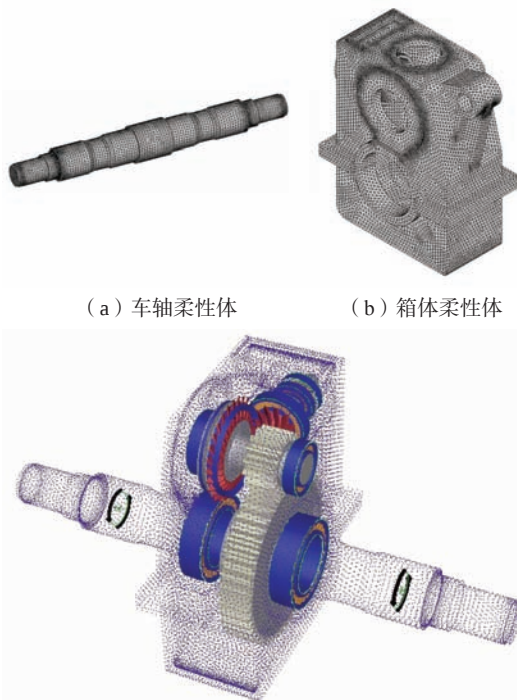
①通过软件专用模块完成包括轴、齿轮副和轴承在内的各传动轴系的建模和装配；②借助三维软件 Inventor 和有限元前处理软件 HyperMesh 进行车轴和箱体柔性体的建模和装配；③进行工况载荷谱的设置；④运行分析得出结果。

2) 柔性体的建模

车轴和箱体采用柔性体建模，方法如下：

①利用 Inventor 建立三维实体几何模型；②导入到 HyperMesh 中定义材料参数、单元属性、划分单元、添加边界约束，以 Nstran 的 bdf 格式导出有限元模型；③在 Romax 软件中导入有限元模型，并完成与各轴承、载荷和刚性连接等相关节点的耦合连接；④利用 Romax 软件自身求解器完成有限元模型缩聚，得到并加载缩聚后的刚度矩阵，以供后续计算和分析使用。

车轴和箱体柔性体有限元模型如图 2(a) 和图 2(b) 所示；车轴齿轮箱刚柔耦合虚拟样机如图 2(c) 所示（点状部分为导入的车轴和箱体柔性体）。



(c) 虚拟样机

图 2 刚柔耦合虚拟样机

3) 加载工况

齿轮箱传动部件的使用寿命按 2 个厂修期 100 万 km (等效 52 500 h) 设计, 根据实际工况等效的输入端载荷谱如表 1 所示。

表 1 输入端载荷谱

工况	时长 /h	转速 /(r·min ⁻¹)	转矩 /(N·m)
1	1 575	235	1 622
2	4 200	470	1 035
3	5 250	588	846
4	10 500	705	733
5	12 075	846	607
6	13 650	1 176	423
7	5 250	1 505	353

3 计算和分析

3.1 齿轮修形和疲劳强度校核

1) 圆柱齿轮修形设计

齿轮修形方式采用对主动小齿轮进行螺旋线和齿

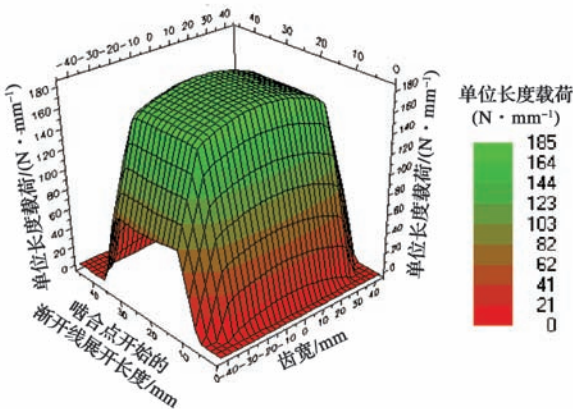
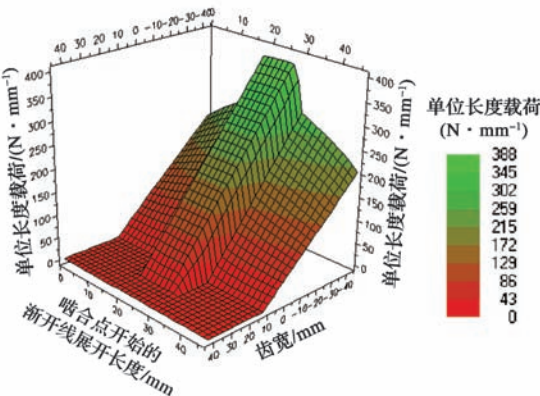
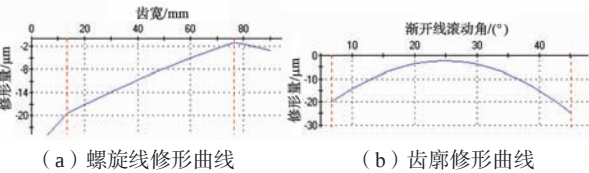


图 3 修形曲线和齿面载荷分布图

廓修形, 被动大齿轮进行简单倒圆。主动小齿轮修形曲线如图 3(a) 和图 3(b)。选择表 1 工况 6 作为修形设计的主要工况, 修形前后的齿面载荷如图 3(c) 和图 3(d)。从图 3 可以看出: 未经修形的轮齿由于部件受载变形导致在齿宽方向存在较为严重的偏载, 最大齿面载荷为 388 N/mm; 修形后的载荷在齿宽中部分布较为均匀并逐渐向齿宽两端面递减, 最大齿面载荷为 185 N/mm, 表明修形曲线的设计合理、效果明显。

采用图 3(a) 和图 3(b) 修形曲线的齿轮接触应力如图 4 所示。从图 4 可以看出: 小齿轮接触应力在齿宽方向由齿宽中部逐渐向两端减小, 在齿高方向偏向齿根, 最大接触应力为 618.4 MPa; 大齿轮接触应力分布合理, 最大接触应力为 620.7 MPa。

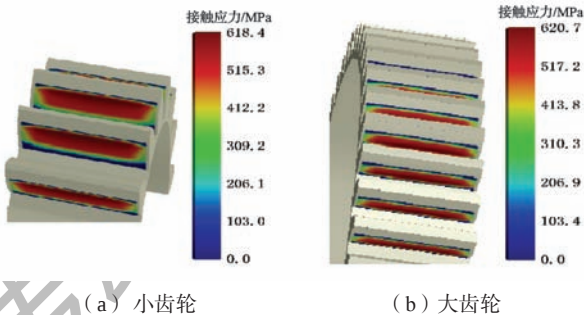


图 4 修形后齿轮接触应力云图

2) 齿轮疲劳强度校核

在虚拟样机模型上加载载荷谱并运行计算, 齿轮疲劳强度计算结果如表 2 所示, 齿轮编号按图 1 索引。从表 2 中可以看出: 各齿轮的综合寿命均大于 52 500 h, 满足设计寿命要求; 最低接触安全系数为 1.2, 最低弯曲安全系数为 1.32, 各齿轮在设计寿命期限内是安全的。

表 2 齿轮综合寿命和安全系数

齿轮	综合寿命/h	安全系数	
		接触	弯曲
1	1.17E6	1.20	1.41
2	2.74E6	1.20	1.32
3	3.22E6	1.44	4.69
4	1.08E8	1.57	4.40

3.2 轴承寿命和损伤校核

表 3 为轴承寿命和损伤校核计算结果, 轴承编号按图 1 索引。从表 3 中可以看出: 寿命和损伤率均满足设计要求。

表 3 轴承寿命和损伤

轴承	寿命/h		损伤率/%	
	ISO281	校正 ISO281	ISO281	校正 ISO281
B1	4.69E9	1.69E9	0.0	0.0
B2	1.25E5	1.18E5	33.7	35.7
B3	2.06E5	1.21E5	20.4	34.8
B4	6.84E5	3.66E5	6.1	11.5
B5	1.73E5	1.34E5	24.3	31.4
B6	6.07E8	9.16E7	0.0	0.0
B7	3.20E7	8.02E6	0.1	0.5

3.3 箱体静强度计算和模态分析

1) 箱体静强度计算

采用最恶劣的静载荷工况: 转换至输入端转矩为 2 300 N·m, 计算结果如图 5 所示。从图 5 中可以看出最高等效力出现在箱体悬吊孔结构与箱体壳体交界处区域为 69.6 MPa, 低于箱体材料屈服极限 230 MPa, 可

以认为箱体强度满足设计要求。

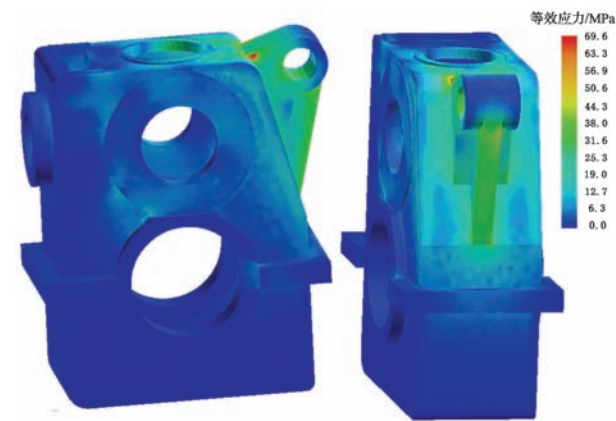


图 5 箱体等效应力云图

2) 箱体模态分析

为减小传动系统的振动、噪声和判断是否发生系统共振，需要对箱体进行模态分析，计算固有频率和振型。由于高阶振动会因为阻尼的存在而迅速衰减，难以引起共振，因此在一般的模态分析中，通常只考虑低阶模态^[9-10]。本文计算的是箱体的约束模态，表 4 列出的是前 12 阶箱体频率，图 6 是前 3 阶振型图。

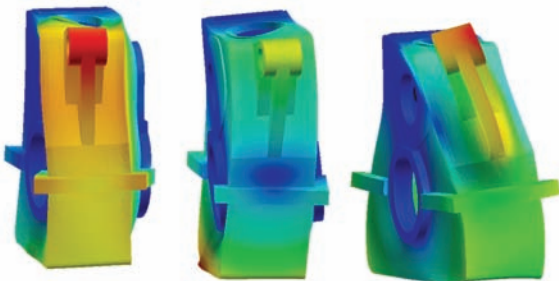
车轴齿轮箱的最高设计输入转速为 2 500 r/min，由此计算出：

①各轴转动频率：输入锥齿轮轴为 41.7 Hz，中间齿轮轴为 17.9 Hz，车轴为 5.5 Hz；

②各齿轮副啮合频率：锥齿轮副为 500 Hz，圆柱齿轮副为 267.9 Hz。

上述频率均低于箱体的一阶固有频率，故传动系统与箱体不会发生共振现象。

图 6(a) 第 1 阶振型，箱体中部区域沿轴承孔轴线方向弯曲摆动；图 6(b) 第 2 阶振型，箱体下部区域沿轴承孔轴线方向弯曲摆动；图 6 (c) 第 3 阶振型，沿箱体对角线扭曲摆动。



(a) 第 1 阶振型 (b) 第 2 阶振型 (c) 第 3 阶振型
图 6 前 3 阶振型图

4 结论

以齿轮传动分析软件 Romax 为平台，使用其专业的建模和分析模块，通过导入第三方软件生成的车轴、箱体柔性体有限元模型，建立了隧道牵引机车用车轴齿轮箱的刚柔耦合模型，并依据载荷谱进行设计计算，主要得到以下结论：

①齿轮修形可有效减小齿面接触载荷并使之合理分布；

②进行了齿轮疲劳强度及寿命、轴承寿命和箱体静强度校核计算，结果表明设计方案满足设计要求；

③进行了箱体的模态分析，结果表明设计方案可以避免系统共振。

截至 2016 年底，该车轴齿轮箱已成功应用于某隧道多个掘进工程标段的牵引机车上，实际运行效果良好，表明该刚柔耦合模型用于车轴齿轮箱的设计开发是可行的，并且能有效缩短研发周期。

参考文献：

[1] 马星国, 杨伟, 尤小梅, 等. 行星轮系刚柔耦合多体动力学分析[J]. 中国工程机械学报, 2009, 7(2): 146-152.

[2] 张庆霞, 王兴贵, 杜秀菊, 等. 基于虚拟样机技术的行星轮系的动力学仿真研究[J]. 机械传动, 2006, 30(4): 4-6.

[3] Heege A, Betran J, Radovic Y. Fatigue load computation of wind turbine gearboxes by coupled finite element, multi-body system and aerodynamic analysis [J]. Wind Energy, 2007, 10(5): 395-413.

[4] 夏永. 基于 ADAMS 的风电齿轮箱动力学仿真分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.

[5] 董海龙. 刚柔耦合行星齿轮减速器仿真研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2013.

[6] Helsen J, Heirman G, Vandepitte D, et al. The influence of flexibility within multibody modeling of multi-megawatt wind turbine gearboxes [C] //Proc International Conference on Noise and Vibration Engineering. Leuven, Belgium: Katholieke Universiteit Leuven, 2008: 2045-2071.

[7] Peeters J, Vandepitte D, Sas P. Flexible multibody model of a three-stage planetary gearbox in a wind turbine [C] //Proc ISMA. Leuven, Belgium: Katholieke Universiteit Leuven, 2004: 3923-3941.

[8] 曹亚玲. YT270 型隧道牵引车车轴齿轮箱的设计[J]. 机械工程与自动化, 2013(2): 80-81.

[9] 凌天谋, 余卓平. 基于 Romax 的电动汽车减速箱设计分析[J]. 机械工程师, 2015(1): 106-108.

[10] 袁夏丽, 唐华平, 谭永青, 等. 重型矿用自卸车车架的模态分析和结构优化[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2014, 37(12): 1425-1429.

作者简介：廉振红（1981-），男，硕士，讲师，研究方向为齿轮传动系统和汽车变速箱。