

高速变轨距转向架轴箱轴承选型及寿命评估

韩光旭¹, 周殿买¹, 黄志辉²

(1. 中车长春轨道客车股份有限公司, 吉林 长春 130062;
2. 西南交通大学 牵引动力国家重点实验室, 四川 成都 610031)

摘要: 阐述了一种高速动车组变轨距转向架轴箱轴承的选型分析, 包括对轴承形式、轴承精度、轴承材质、润滑脂类型、润滑脂填充量、轴承密封及轴承游隙等的分析, 确定了变轨距转向架轴承的基本型式和尺寸。考虑变轨距转向架运用特性, 按照安全导向, 以偏载侧圆锥轴承的应力 1.6 倍于未发生偏转时的应力计算, 可得当量动载荷偏载 21.75 mm, 轴承计算里程仍能达到 190 万 km。计算结果表明, 所选轴承满足设计要求。

关键词: 高速动车组; 变轨距技术; 转向架; 轴箱轴承; 选型; 偏载量; 寿命评估

中图分类号: U266.2; U260.331^{+.2}

文献标识码: A

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2018.04.002

Type Selection and Life Assessment of High-speed Gauge-changeable Bogie Axle Box Bearing

HAN Guangxu, ZHOU Dianmai, HUANG Zhihui

(1. CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., Changchun, Jilin 130062, China; 2. State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: The type selection analysis of an axle box bearing for the gauge-changeable bogie of high-speed EMUs was described, including the analysis of bearing form, bearing precision, bearing material, lubricating grease type, grease filling amount, bearing seal and bearing clearance, etc., and the basic type and size of the bearing of the gauge-changeable bogie were determined. Considering the application characteristics of the gauge-changeable bogie, according to the safety guidance, with the stress calculation of the tapered bearing on the partial load side being 1.6 times that of the stress calculation without deflection, when the equivalent load was 21.75 mm, the calculation mileage of the bearing could still reach 1 million 900 thousand km. The calculation results showed that the selected bearings met the design requirements.

Keywords: high-speed EMUs; gauge-changeable technology; bogie; axle box bearing; type selection; partial load; life assessment

0 引言

为了满足跨国联运快速互联互通要求, 迫切需要研制一种适应不同国家轨距条件的变轨距高速动车组列车。变轨距高速动车组的技术核心是变轨距转向架, 变轨距转向架的技术核心部件之一为轴承。由于需要实现轨距变化, 轴承需承受偏载, 是极不利的工作状态, 因此, 轴箱轴承的性能优劣直接影响到能否完成转向架及车辆的最终设计。本文以 1 435 / 1 520 mm 变轨距转向架研发项目为契机, 从影响轴承性能的主要因素—

轴承结构(形式、保持架、内部形状)、轴承质量(材质、热处理、精度)、润滑脂(质量、数量、种类)、密封(形式、质量)和工作环境等方面对变轨距高速动车组的轴箱轴承选型进行详细论述, 并对选定的轴承寿命进行评估。

1 变轨距转向架轴承工作特点

由于高速动车组具有高速运行特性, 对轴箱轴承提出了更高的要求。轴承在运用中承受来自轮轨滚动接触产生的较大交变动、静载荷作用, 因此, 要求轴承耐振、耐冲击、寿命长, 而且要有较小的尺寸与重量, 以确保行车安全。

变轨距转向架基本技术参数见表1。

表1 变轨距转向架基本技术参数

项目	参数值
轴重	17 t
簧下质量	2.6 t
最大速度	400 km/h
平均运行速度	300 km/h
新轮径 / 半磨耗轮径 / 磨耗到限轮径	920/885/850 mm
轴承寿命要求	不小于 120 万 km

由于变轨距转向架需要满足不同轨距的变化要求, 因此, 在车轮沿车轴轴向滑动时, 轴承也需要随之滑动, 这就导致了轴承径向力将产生对应的横向移动量, 即轴承将存在一定的偏载。当轨

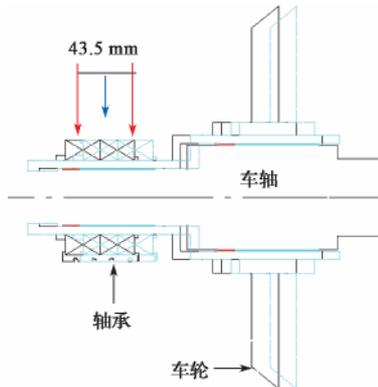


图1 变轨距转向架轴承承受径向偏载

距在 1 435 mm 和 1 520 mm 之间变化时, 这个移动量为 43.5 mm。为了使偏载尽量小, 设计要求为 1 435 mm 轨距时, 轴承径向力作用在图 1 右侧箭头处, 而为 1 520 mm 轨距时, 轴承径向力作用在左侧箭头处, 此时, 2 种工况下, 轴承的偏载量最小, 为 21.75 mm。

2 变轨距轴承选型

2.1 轴承型式

目前世界高速铁路所采用的轴箱轴承主要是圆柱滚子轴承和圆锥滚子轴承 2 种形式, 在 200~250 km/h 速度的运用条件下, 使用 2 种结构的轴承, 都取得了较成功的使用经验。大量的研究表明, 两者在性能上无明显差异。轴承选型时应尽量降低轴承运转温度, 同时提高轴承使用寿命并且实现小型轻量化。

当车辆的运行速度超过 250 km/h, 采用圆锥滚子轴承要优于采用圆柱滚子轴承。因为在高速、高负荷情况下圆锥滚子轴承具有如下特点: 列车运行时, 尤其是在通过曲线时, 轴承同时承受轴向力和径向力的复合载荷。由于圆锥滚子轴承是靠其具有一定压力角的滚子承受轴向力, 仅仅约 20% 的轴向力由挡边承受, 而圆柱滚子轴承的挡边则承受全部轴向力。因此在轴向承载能力这一点上圆锥滚子轴承更有优势。同时, 由于圆柱滚子轴承的圆柱面滚道不承受轴向载荷, 轴向载荷全部由圆柱滚子轴承滚子的端面与套圈的挡边承担, 滚子端面和挡边之间的滑动摩擦将使得轴承温度升高, 并产生磨耗, 因此圆柱滚子轴承的轴向承载能力相较圆锥滚子轴承低。

由于圆锥滚子轴承摩擦力矩小, 摩擦产生的温度低, 故超过 250 km/h 速度的车辆, 通常选用圆锥滚子

轴承。变轨距转向架持续运行速度大于 300 km/h, 优先选用圆锥滚子轴承。

2.2 轴承的精度

轴承的精度是指基本尺寸精度和旋转精度, 轴承的基本尺寸是指内径、外径、套圈宽度、倒角尺寸及尺寸公差等; 轴承的旋转精度是指内外圈径向跳动、轴向跳动、内圈端面对内径的垂直度、外圈端面对端面的垂直度。轴承的精度等级不同, 对轴承零件的表面粗糙度和工艺过程均有不同的要求, 精度高的轴承寿命较长, 极限转速也可提高, 但制造成本也比较高。

高速轴承, 例如 SKF 和 FAG 公司滚动轴承的尺寸、形状和精度按 ISO 标准设定, 一般分为普通级、P6、P5、P4、SP 级和 UP 级, 考虑列车的高速运行条件, 一般高速铁路客车的轴承精度等级为 6 级。变轨距转向架轴承转速不超过 2 400 r/min, 采用 6 级精度即可。

2.3 轴承的材质

轴承的寿命在很大程度上取决于轴承材料的质量, 为保证高速列车安全与轴承质量, 通常要求轴承套圈及滚动体具备硬度高、抗滚动疲劳能力强、耐磨损以及尺寸稳定性好等特性。特别是对显著影响滚动疲劳寿命钢材中的非金属夹杂物要严格控制含量。各种非金属夹杂物中, 硬质氧化物容易成为疲劳裂纹的起点, 因此需要采用非金属夹杂物含量少的清洁钢料。

轴承厂家通常采用经真空脱气处理以及炉外精炼后, 有害氧化物及夹杂物含量减少的清洁钢材, 对要求高可靠性的轴承, 采用清洁度更高的真空熔炼钢 (VIM, VAR) 或电渣熔炼钢 (ESR)。

对于轴承保持架材料来讲, 必须具有能够承受旋转振动与径向冲击载荷的强度, 与滚动体及滚动面接触的摩擦小、质量小且能够适应轴承运转温度。因高分子材料保持架在具有质量小及耐腐蚀特性的同时, 还具有良好的抗衰性及自润滑性能, 所以变轨距转向架轴承采用高分子材料保持架。

2.4 轴承润滑脂类型

轴承润滑的目的是使滚动件的金属表面形成一层薄薄的油膜, 以防止金属与金属直接接触。对轴箱轴承而言, 润滑的作用主要为降低摩擦及磨损、带走摩擦热、延长轴承的寿命、防止锈蚀和防止异物入侵。适宜的油膜厚度是防止轴承疲劳的临界条件, 同时润滑油的粘度和化学成分也影响轴承寿命。实际经验及研究结果都已证明, 若轴承滚动体与滚道的滚动表面之间能被润滑油膜有效分隔, 并且滚动表面未因沾染异物而至破坏, 在这样的理想条件下, 轴承寿命可以非常长久。由此充分说明润滑条件对轴承寿命及性能的影响是非常大的。

轴承的润滑可采用润滑油或润滑脂, 两者的主要区别是: 润滑油可用于高负荷、高速、高温的环境下, 润滑性能好, 对减少振动和噪声也很有利, 但主要问题是密封装置设计复杂, 维护保养困难。由于变轨距

转向架变轨机构要占有轴箱、轴承空间,要求轴承结构简单、紧凑,因此,虽然脂润滑在耐高温、润滑性能等方面不如油润滑好,然而密封装置较简单,维护保养较容易,所以变轨距轴承采用润滑脂润滑。目前,我国高速轨道车辆轴承运转温度为 $-30\sim 120^{\circ}\text{C}$,润滑脂也能满足要求。

2.5 润滑脂填充量

高速列车轴箱轴承,使用粘度高的润滑脂会使轴承工作温度高,减少润滑脂寿命,造成轴承早期疲劳破坏,所以要求使用低粘度的润滑脂。

润滑脂的填充量取决于轴承的设计、空间容积、转速和润滑脂的种类等,通常润滑脂的填充量为轴承容积的 $30\%\sim 50\%$,高速旋转场合或抑制温升场合,所需填充量更少。如果润滑脂填充量过多,温升增大,润滑脂会出现软化而导致泄漏或氧化等,进而导致变质而造成润滑性能下降。

润滑脂填充量与车辆运行有密切关系,尤其对高速运行的车辆更为重要,所以在轴承设计中要关注轴承润滑脂的填充量。经核算针对变轨距轴承内部空间选定内部注脂量为 $290\sim 310\text{g}$ 。

2.6 轴承的密封

对于轴承而言,采用密封结构的作用是防止轴承内部润滑剂泄漏,防止外部粉尘、水分或其他异物侵入并污染轴承内部。选择密封装置时,主要考虑因素为:润滑剂的种类(油润滑、脂润滑)、密封部位的线速度、轴的安装误差、填充空间、密封圈摩擦及由此产生的温升及成本等等。轨道车辆轴箱轴承的密封结构大致可分为接触密封和非接触密封2类。

非接触密封是轴承密封罩与轴承内圈之间存在小间隙的密封方法,几乎无摩擦,适宜于高速旋转。

接触密封是包覆在钢制骨架上的合成橡胶等的端部压在轴上进行密封的方法。接触密封的密封性能优于非接触密封,但摩擦力矩及温升更大。

对轴承密封的选择要充分考虑轴承的运用环境、温升要求及寿命要求等因素。变轨距轴承选用非接触式密封的轴承自密封结构,并对轴箱进行密封处理,防止外部水、尘进入轴承内部。

2.7 轴承的游隙

轴承的内部游隙,是指轴承固定内圈或外圈中的任意一个,为固定的套圈沿径向或轴向移动时的移动量称之为轴承的内部游隙,按照移动方向,分别称为径向内部游隙和轴向内部游隙。

径向游隙对轴承的工作性能有重要影响,每一种轴承在一定的作用条件下,都有最佳的径向游隙,使轴承寿命长,摩擦阻力小和磨损小。

正确地选择适宜的轴承游隙,可以使轴承的负荷合理地分布于滚动体之间,减少轴承工作时的振动和噪声,轴承转动灵活。

影响轴承游隙的主要因素是轴承及轴箱体的配合

形式与公差、加工精度、轴温的变化及轴承的负荷。游隙过小,会使轴承工作温度升高,不利于润滑,影响轴承不同方向力的正确传递,甚至使滚子卡死;游隙过大,会使轴承寿命减短,使振动与噪声增大,所以选择合适的游隙非常重要。

设计时充分考虑了上述轴承选型的影响因素,选定变轨距转向架轴承参数如表2。

表2 选定的变轨距转向架轴承参数

项目	参数值或说明
轴承型式	圆锥滚子轴承单元
轴承尺寸	$180\text{ mm} \times 280\text{ mm} \times 167\text{ mm}$
轴承径向游隙	$0.533\sim 0.685\text{ mm}$
油脂类型	润滑脂 L218
注脂量	$290\sim 310\text{ g}$

3 轴承寿命评估

3.1 作用在轮对轴承上的载荷

车辆在运行过程中的轴承受力示意图如图2,轴承承受来自垂向、纵向及横向的作用力,分别对应于图2中 z 、 x 、 y 3个方向。

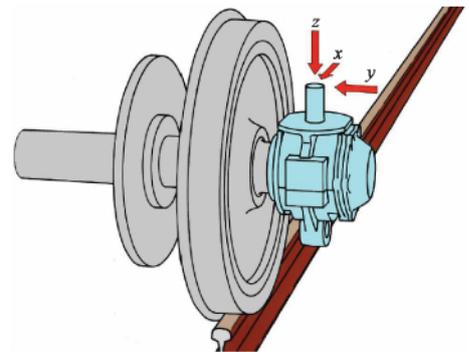


图2 轴承受力状态示意图

轴承寿命计算过程中,需将承受的各作用力转化为当量动载荷 P ,对向心圆柱滚子轴承单元或圆锥滚子轴承单元,则需转化为当量径向动载荷,其计算公式为

$$P = \frac{(A - G_R) \cdot g \cdot f_z \cdot f_a}{i_R}$$

式中: A 为轴重, kg ; G_R 为簧下质量, kg ; g 为 9.81 m/s^2 ; f_z 为考虑冲击载荷的垂向动载系数; f_a 为轴向载荷系数; i_R 为每轮对上的轴承数量。

经计算,轴承当量动载荷为 113 kN 。

3.2 轴承寿命

由于轴承的内外圈滚道面和滚动体需承受交变应力,导致材料产生疲劳剥落,这种轴承疲劳剥落之前的总转数即为轴承寿命。

1) 基本额定寿命

运用统计学方法,定义一组轴承在同一工况下分别进行运转时,90% (可靠性90%)的轴承不发生滚动疲劳剥落的旋转总转数,或者以某固定转速旋转时,总旋转时间即为轴承的基本额定寿命。

滚动轴承的基本额定动载荷是指额定寿命为 10^6 转时所能承受的负荷。轴承的基本额定动载荷 C 可查阅

轴承产品样本。

根据标准 ISO 281, 轴承基本额定寿命 L_{10} 的计算公式为

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P} \right)^p$$

式中: L_{10} 为基本额定寿命 (90% 可靠性), 10^6 转; C 为基本额定动载荷, N; P 为当量动载荷, N; p 为寿命指数, 圆柱轴承为 3, 圆锥轴承为 10/3。

经计算, 轴承基本额定寿命为 $3\ 400 \times 10^6$ 转。

2) 等效车辆运行里程

将轴承基本额定寿命转换为车辆走行里程

$$L_{km} = L_{10} \cdot D_R \cdot \pi$$

式中: L_{km} 为理论计算寿命; D_R 为车轮轮径 (半磨耗), m。

经计算, 轴承计算里程为 950 万 km。

3) 当量动载荷发生偏转后车辆运行里程

目前对于轴承寿命评估大都基于理想受力状态条件建立的, 对于轴承偏载受力条件下的研究甚少, 变轨距项目轴承选型后, 对变轨距轴箱轴承偏载条件下的寿命进行评估, 计算过程如下:

a. 建立轮对-轴承的受力模型

模型中 (如图 3), 对轴承施加实际状态下偏载的径向载荷。转速按照列车 300 km/h 的运行速度施加。



图 3 建立轴承轮对受力模型

b. 轴承受力计算

根据输入条件, 计算出轴承偏载条件下的受力分布水平及应力水平, 如图 4。

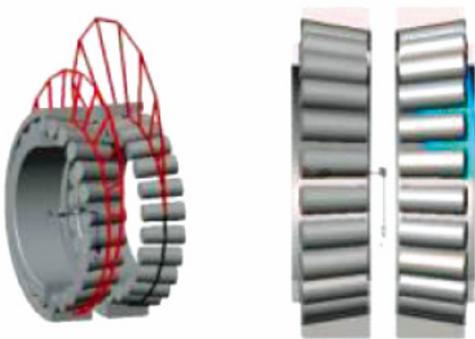


图 4 轴承受力分布及应力水平

c. 受力水平比较

根据计算结果, 轴承发生偏载时, 偏载侧圆锥轴承上方的应力水平较未发生偏转时偏大 1.6 倍。按照安全导向, 以 $1.6P$ 计算等效车辆运行里程, 可得当量动载荷偏载 21.75 mm 时, 轴承计算里程为 190 万 km。

4 结语

变轨距转向架轴承与传统转向架相比, 由于轴承需要承受偏载, 造成轴承寿命大幅度降低, 在设计时应重点考虑。

考虑偏载条件, 轴承计算里程为 190 万 km, 低于轴承常规条件运用里程 950 万 km, 但仍能满足不小于 120 万 km 的使用要求。由于偏载条件下轴承寿命急剧缩短, 安全裕量降低, 但变轨条件轴承又必须承受偏载, 因此, 为保证安全, 可在动车组等级修时增加轴承检测项点, 必要时, 动车组上增设轴承检测传感器, 对轴承的实时状态进行监控。

参考文献:

- [1] SKF 集团. SKF 轴承综合型录 [Z]. 日本: SKF 集团, 2004.
- [2] 严隽毫, 傅茂海. 车辆工程 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2008.
- [3] 西南交通大学. 变轨距调研报告 [R]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- [4] 李芾, 黄运华, 傅茂海. 变轨距转向架发展及其可行性研究 [J]. 铁道机车车辆, 2002 (5): 1-5.
- [5] 德田憲暁, 藤田豊志, 佐藤栄作, 等. 軌間可変台車の開発 [J]. 鉄道総研報告, 2000, 14 (10): 19-24.
- [6] 高尾喜久雄. フリーゲージトレインの開発—軌間の異なる新幹線と在来線の直通運転を目指して— [J]. 日本機械学会第 18 回交通・物流部門大会講演論文集, 2009: 67-70.

作者简介: 韩光旭 (1989-), 男, 硕士, 工程师, 从事机车车辆转向架研究。