

文章编号: 1005-0523(2021)01-0113-09

DOI: 10.16749/j.cnki.jecjtu.2021.01.018

高速列车齿轮箱疲劳可靠性及故障诊断研究现状

朱海燕, 朱志和, 肖乾, 王超文, 袁遥, 许期英

(华东交通大学载运工具与装备教育部重点实验室, 江西 南昌 330013)

摘要:随着高速列车速度不断提高牵引齿轮箱服役环境越发复杂, 齿轮箱服役性能也面临更大的考验。基于齿轮箱内、外及耦合激励对其振动响应的影响, 国内外学者对高速列车齿轮箱的振动特性和故障诊断做了大量的研究; 针对已有的研究成果, 主要从齿轮箱强度、可靠性及寿命、箱体故障诊断及监测方面归纳总结, 详细阐述了高速列车齿轮箱振动特性分析及故障诊断所采用的方法和研究现状, 并且对未来重点研究方向提出建议和展望。

关键词:高速列车; 齿轮箱; 故障; 振动响应

中图分类号: U279

文献标志码: A

本文引用格式: 朱海燕, 朱志和, 肖乾, 等. 高速列车齿轮箱疲劳可靠性及故障诊断研究现状[J]. 华东交通大学学报, 2021, 38(1): 113-121.

Research Status of Fatigue Reliability and Fault Diagnosis of High-Speed Train Gearbox

Zhu Haiyan, Zhu Zhihe, Xiao Qian, Wang Chaowen, Yuan Yao, Xu Qiyang

(Key Laboratory of Conveyance and Equipment of the Ministry of Education, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: As the speed of high-speed trains continues to increase, the service environment of traction gearboxes is becoming more and more complex, and the service performance of gearbox is also facing greater challenges. Based on the influence of the internal excitation, external excitation and coupled excitation of the gearbox on its vibration response, domestic and foreign scholars have done a lot of researches on the vibration characteristics and fault diagnosis of the high-speed train gearbox. According to the existing research results, this paper mainly summarizes the gearbox strength, reliability and life, fault diagnosis and monitoring of the gearbox. The method and research status of vibration characteristics analysis and fault diagnosis of high-speed train gearbox are elaborated in details, and suggestions and prospects for future key research directions are proposed.

Key words: high speed train; gearbox; fault; vibration response

Citation format: ZHU H Y, ZHU Z H, XIAO Q, et al. Research status of fatigue reliability and fault diagnosis of high-speed train gearbox[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2021, 38(1): 113-121.

高速列车齿轮箱是由齿轮副、传动轴等组成的传动系统和由轴承、箱体等组成的结构系统, 是一个复杂的弹性机械系统, 属于高速列车十大配套关键技术之一。齿轮箱工作性能很大程度上决定列车

运行的安全可靠, 研究齿轮箱振动特性对于保障高速列车的正常运营具有实际意义。

由于随高速列车齿轮传动系统故障的恶化会呈现出不同的振动状态, 齿轮箱箱体的振动特性一

收稿日期: 2020-09-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(51665015); 江西省自然科学基金面上重点项目(20202ACBL204008); 江西省教育厅科技项目(GJJ190294, GJJ190308, GJJ190333); 牵引动力国家重点实验室开放课题(TPL2007)

作者简介: 朱海燕(1975—), 男, 副教授, 博士, 研究方向为车辆系统动力学。E-mail: zhupetrelcao@163.com。

定程度上能反映其工作状况。高速列车齿轮箱振动激励主要包括3部分:① 齿轮啮入、啮出时的冲击导致齿轮产生自激振动;② 由于齿轮制造工艺及使用过程中的缺陷引起齿轮箱体异常振动;③ 列车在高速运行时,由于轨道波磨、轨缝、三角坑、不平顺、踏面磨耗、多边形等诱发的外部激励。随着高速列车运营速度不断提高,因齿轮箱服役环境逐渐恶劣而引起齿轮箱故障问题日益严峻。据已发生裂纹故障的齿轮箱统计表明,高速列车齿轮箱故障一般有箱体裂纹、箱体内油温超标和渗漏等,其中齿轮箱体出现裂纹是最主要的故障形式,且齿轮箱体疲劳裂纹一般出现在齿轮检查孔和油位观察窗周围。此外,统计表明超过一半的裂纹位置出现在上箱体,其余部分出现在下箱体,国内高速列车齿轮箱体曾出现的裂纹位置如图1(a)、图1(b)所示,而国外高速列车同样有类似的故障,如图1(c)所示是日本新



(a) 下部裂纹



(b) 上部裂纹



(c) 箱体开裂

图1 齿轮箱体缺陷^[1]

Fig.1 The diagrams of gearbox defects

干线高速列车齿轮箱箱体开裂脱落导致传动大齿轮裸露在外面。齿轮箱体的故障直接影响高速列车的正常运营,因此研究高速列车齿轮箱的疲劳强度显得尤为必要。

主要从齿轮箱箱体疲劳研究、齿轮箱箱体强度分析、可靠性及寿命分析和齿轮箱故障诊断监测4个方面阐述目前对高速列车齿轮箱研究所采用的科学方法以及研究成果。

1 齿轮箱疲劳研究及振动激励

1.1 箱体疲劳研究

疲劳破坏是构件的主要失效形式之一,在很早之前学者们发现当结构的固有频率与交变载荷频率产生交集时会发生共振现象,共振使很小的激励产生巨大的振动响应而发生疲劳破坏,由于共振引起的结构疲劳失效定义为共振疲劳^[2]。1958年,GRANDALL S H等^[3]在结构疲劳的基础研究中引入随机振动理论,但随机振动理论仅对使结构发生共振激励有效,对于交变载荷等复杂问题无有效方法。1963年,在随机振动理论基础上,GRANDALL S H等^[4]初次将振动疲劳阐述为在交变载荷激励下形成的一类损伤累积且不可逆的振动强度破坏,这也是首次将交变载荷激励的概念引入振动疲劳研究中,为后来研究结构疲劳破坏提供了非常有价值的理论基础。1975年,姚起杭等^[5-6]提出振动疲劳概念,而后在此基础上把结构疲劳分为静态疲劳和振动疲劳开展研究,很好的解决了部分工程结构振动的问题,但对现今一些精密仪器振动疲劳研究还需要进一步改进。HAIBA M^[7]和 AYKAN M等^[8]认为研究结构振动疲劳问题应该考虑外部激励和固有频率响应。工程应用中振动疲劳一般包括共振疲劳和非共振疲劳,在交变载荷作用下引发结构共振使局部应力集中或薄弱位置处产生疲劳断裂,疲劳破坏是由结构共振和应力集中共同导致的^[9]。ZHANG J等^[10]研究表明疲劳破坏是引起高速列车齿轮箱失效的主要因素,随后又校核其疲劳强度,认为齿轮箱的主要故障形式是疲劳断裂。疲劳破坏是机械结构不可避免的问题,探究引起疲劳破坏的影响因素是高速列车齿轮箱研究的重点。

1.2 内、外及耦合激励

共振疲劳裂纹是高速列车齿轮箱最常见的故障形式,结合仿真分析和线路试验探究齿轮箱的共

振原因,引起齿轮箱箱体异常振动的激励主要分为内部激励、外部激励和内外耦合激励,内部激励的研究主要基于齿轮系统开展。李润方^[11]通过建立非 Hertz 接触的齿轮啮合有限元模型,研究齿轮刚度变化、齿轮啮合冲击及齿轮传递误差对啮合刚度的影响,为后期研究齿轮箱内部激励对箱体振动的影响奠定的基础,ABBES M S^[12]建立斜齿圆柱齿轮副及箱体的动力学模型,研究了齿轮与箱体的相互作用。周建星^[13]考虑齿轮啮合刚度时变特性和齿轮误差等内部激励,建立齿轮箱稳态动响应分析模型,分析了内部激励中谐波成分对箱体动响应的影响。黄冠华^[14]基于齿轮刚度激励和误差激励等内部激励建立高速列车非线性动力学模型,通过仿真分析认为齿轮内部激励对电机和齿轮箱的振动有一定影响,对车体和构架的振动基本无影响,同时考虑内部激励和外部激励较为真实地反映了箱体振动特性,也为分析耦合激励对箱体振动影响奠定了基础;齿轮箱体内激励主要是由于齿轮传动引起,由于齿轮箱体的封闭结构,很难直接测得箱体内部齿轮啮合特性,所以目前采用的方法大多是数值仿真。

外部激励的研究则着重于轮轨激励对箱体振动的影响,李广全等^[15]对齿轮箱箱体的典型工况振动响应开展模态分析,结果表明,高速列车在直线运行工况下,由轮轨激励引发的箱体振动频率与其固有频率很相近,箱体局部共振导致产生裂纹,外部激励频率和箱体固有频率有交集引发齿轮箱体共振,是导致齿轮箱开裂的常见原因。何斌斌^[16]采取 Hibert-Huang 变换时频方法^[17],在已掌握的齿轮振动特性基础上开展信号分析,结果同样表明是由车轮多边形激励使齿轮箱体发生共振导致裂纹。袁雨青^[18]通过线路实际测试,明确车轮 20 阶磨耗激起的振动频率与其固有频率有交集,由共振引起剧烈振动,经过探究能够确定引起齿轮箱共振的车轮磨耗阶数是研究轮轨激励的重要突破,为后期车轮设计和维护提供学术指导,线路试验也是探究列车齿轮箱工作特性的常见手段,其优点在于试验数据可以更真实地反映齿轮箱工作状态便于后期的数据分析,但其耗时长,成本高也是明显的缺点。

由于高速列车服役环境的复杂性,列车在运营过程中齿轮箱会受到复杂多变的内外载荷,诸多学者研究了在内外耦合激励作用下齿轮箱的振动特性,黄冠华等^[19]考虑齿轮时变啮合刚度、传动误差及

轮轨磨耗引起的车轮黏滑振动建立了高速列车整车动力学模型,分析认为齿轮传动系统中存在谐波振动,且扭矩波动改变系统的振动主频,加剧箱体的振动,而黏滑振动则严重影响齿轮的啮合稳定性,进而使箱体异常振动;为更加真实反映内、外耦合激励作用下齿轮箱的振动特性,通过采集武广线路谱的不平顺样本作为外部激励,同时考虑齿轮时变啮合刚度、传递误差及啮合阻尼等内部激励进行分析,结果表明:异步电机谐波转矩频率和齿轮啮合频率都是箱体动态响应的主频,可能会引起箱体的异常共振,严重威胁齿轮箱工作性能^[20],由此表明内、外耦合激励会引起齿轮箱箱体的振动,而内外耦合激励对箱体具体影响方式及解决措施仍需进一步研究。

综上,高速列车齿轮箱工作环境复杂多变,齿轮箱箱体的振动特性受到内、外及耦合激励作用,研究表明齿轮啮合、轮轨冲击、电机谐波转矩均有可能导致箱体的异常振动,进而引起箱体共振疲劳损伤,且列车在运营过程中齿轮箱通常会受到内外耦合激励的作用;齿轮啮合、轮轨冲击是主要的两大激励因素,齿轮传动的平稳性及车轮多边形的形成机理是研究的重点课题,克服齿轮啮合时变特性及抑制车轮多边形的形成可有效提高齿轮箱工作性能,避免异常共振,提高箱体的使用寿命。

2 高速列车齿轮箱强度分析

零部件的强度分析主要结合动力学试验和仿真分析开展,而高速列车齿轮箱强度分析通常需要建立其整车动力学模型和有限元模型,强度校核通常借鉴相关试验标准,齿轮箱体及零部件的强度校核是确保齿轮箱正常服役的重要一步。钟文生等^[21]首次提出了高速动力车承载式铸铝合金齿轮箱的结构特征以及设计理念,用有限元法分析箱体强度均满足使用要求,该设计具有一定的合理性,但列车实际运行时动态受力变化较大,该设计还有待优化。单巍^[22]首先对新设计的齿轮箱箱体结构利用 HyperMesh 软件对其进行网格划分,HyperMesh 软件有效提高网格质量以保证计算结果的精度,再用 ANSYS 软件分析其疲劳强度和静强度,结果表明齿轮箱体疲劳强度符合高速列车运营要求,且在持续工况下箱体不会产生共振现象,说明该型齿轮箱体成功避开了原有的固有频率而不会发生局部共振

现象,在一定程度上提高了齿轮箱工作性能和使用寿命。李众^[23]将传动系统运动方程和牵引电机运动方程耦合,采用 Simulink/Simpack 建立机电耦合模型,通过对比分析 C 型支架和吊杆吊挂齿轮箱的安装方式,结果表明列车高速运行时 C 型支架的振动加速度相对较小,低速时则相反,且不同的齿轮箱安装方式对车辆横向加速度、纵向加速度及振动特性都有不同的影响。邓晓宇^[24]结合 ANSYS 和 SIMPACK 软件,将齿轮箱体模型的刚性箱体替换为柔性体,考虑原有箱体的模态、形变等因素得到了车辆刚柔耦合动力学模型。通过对比分析柔性箱体和刚性箱体的振动响应发现其振动位移无明显差别,但在振动速度与加速度响应方面柔性箱体相对较大,且柔性箱体会出现高频振动响应引起共振,加剧齿轮箱体的振动。刘建亮^[25]使用有限元分析软件 Workbench 对重新设计的铝合金箱体模型在短路工况和启动工况下进行强度分析,结果表明,在这两种工况下箱体均满足列车运行要求,不会出现塑性变形和裂纹故障。从齿轮箱的重新设计、强度校核、仿真试验验证,每个环节的研究结果对我国自主研发高速列车齿轮箱具有重要意义。何章涛^[26]首先分析传动链得到各轴承实际载荷、箱体受到的电机和轮对激励载荷,而后建立箱体的 FEA 模型开展强度及疲劳分析,最后对仿真结果进行评价,通过实际线路测试验证了该方法的可靠性,并在某几款高速列车齿轮箱的研发工作中成功应用,但齿轮箱的疲劳耐久性还待时间考验,该方法的应用有效降低试验成本,提高箱体强度校核效率及准确性。王起梁^[27]鉴于 ANSYS 仿真分析的操作过程繁琐复杂且易出错,在 ANSYS 软件基础上开发了一种驱动齿轮箱静强度仿真模板,该模板封装自定义了强度分析所需的材料数据、连接关系、计算工况、关键步骤等信息,规范了箱体强度分析过程,形成标准化、模型化操作流程,自动形成规范的仿真分析报告文件,避免诸多人为操作的不确定因素,有效提高强度分析结果的准确性及计算效率,同时降低了仿真分析门槛及劳动强度。

齿轮箱箱体强度研究多通过建立高质量的动力学模型、划分网格、仿真分析等过程,对新设计齿轮箱箱体的强度分析可判断其是否满足使用要求,对已服役齿轮箱基于其工作状态分析箱体和零部件在不同工况下的疲劳强度,依据分析结果对箱体

结构及零部件合理优化,改善齿轮箱的工作性能,提高其使用寿命。

3 高速列车齿轮箱体可靠性及寿命分析

通过引进、消化吸收和再创新,我国已基本掌握了动车组走行部和车体结构的设计理论和方法,但对齿轮箱传动系统的疲劳分析与可靠性研究尚处于起步探索研究阶段。齿轮箱疲劳强度分析的目的在于提高其运行的安全可靠,同时预测并延长其使用寿命,防止过早失效。

3.1 箱体可靠性分析

高速列车运行过程中齿轮箱会受到复杂的振动激励,大多数学者采用建模仿真的方法研究齿轮传动、轮轨激励等对箱体疲劳可靠性的影响,也取得了一定成果。樊红东等^[28]采用 Bayes 方法建立退化曲线,并用退化方程计算齿轮剩余寿命,该方法为预测齿轮箱齿轮使用寿命提供一个有效的借鉴方法。MEEKER W Q 和 HAMADA M^[29]简述了故障类型的分类,说明性能退化和失效之间的关系,并且参考 Paris 模型概述了性能退化研究的相关概念以及该研究方法的优越性。CHOY F K 等^[30]基于模态分析法,通过矩阵法将多个耦合系统转化成彼此独立的运动方程,减少自由度及计算量,再通过编码制作程序,根据箱体结构和系统参数计算齿轮传动的动态响应,依据计算结果判断齿轮箱的可靠性和使用寿命,该方法通过减少自由度和程序设计极大地提高计算效率,为模态分析计算提供了新思路。李丹等^[31]基于转子动力学理论,借助软件工具研究高速列车齿轮箱齿轮转子系统在耦合和不耦合两种情况下的动力学特性,为高速列车运行的稳定性提出科学建议,基于虚拟样机技术,针对齿轮系统的柔性体模型开展动力学仿真,为齿轮的强度、刚度及疲劳寿命的研究提供重要的参考依据。WU H^[32]建立高速列车齿轮箱和轮对模型、非线性轮轨接触模型,联合有限元和多体动力学软件数值模拟列车在车轮多边形轮轨激励下齿轮箱箱体的应力分布,发现齿轮箱体的应力分布受轮对变形的影响较大,且发现具有 20 阶车轮多边形磨损的箱体疲劳损伤比无车轮多边形磨损的疲劳损伤大 63%,已有诸多文献^[16,18]表明列车车轮多边形引起的轮轨激励对箱体的振动影响较大,如何有效降低车轮多边形对齿轮箱体的振动影响还有待研究。王文静等^[33]通过线路

实验分析实际运行工况对齿轮箱体动应力响应及疲劳强度的影响,分析发现列车运行速度和电机输出转矩的增大会引起箱体各测点应力不同程度的增大,且随着列车服役历程的增加,齿轮箱体疲劳可靠性逐渐降低;此外,在一定可靠度范围内,提高铝合金箱体的铸造水平等级会延长箱体的寿命,且箱体铸造孔的大小对箱体的寿命也有一定的影响。

齿轮箱体的可靠性受到齿轮传动、轮轨接触、电机输出等因素的影响,通过分析不同因素对箱体振动特性及疲劳强度的影响,更好掌握齿轮箱箱体在服役工况下的工作状态,同时根据疲劳可靠性分析提出相关优化措施。

3.2 箱体渗油故障

齿轮箱疲劳强度失效的主要形式是箱体出现裂纹及箱体渗油情况,国内外学者也对此做了大量的研究,主要集中探究箱体出现裂纹原因与解决渗油的措施。由于铸造缺陷导致齿轮箱体裂纹的现象非常严重,曹庆峰等^[34]从材料的微观角度,通过电子探针观察材料的结晶过程,分析得到石墨的形状和其体积大小与裂纹生成有紧密关系,并通过石墨的形成过程说明齿轮箱体出现裂纹的原因,从箱体材料入手解决裂纹故障也是重要手段。李枫^[35]针对齿轮箱密封系统出现的渗油现象,采用迷宫密封设计有效解决齿轮箱渗漏问题,为优化齿轮箱密封系统设计方案提供新的思路和方法。刘杰^[36]分析高速列车齿轮箱所采用的方形、圆形、菱形迷宫密封的性能,综合对比发现在相同工况、截面积的 3 种密封迷宫中圆形空腔迷宫密封泄漏量最小,根据分析结果提出了密封的优化方法,改善了列车齿轮箱的密封泄漏问题。针对某型动车组出现的渗油故障,张川宝等^[37]基于 Matlab/Simulink 软件联合仿真分析,发现在牵引电机满足列车正常运营的条件下适当减小齿轮传动比以降低牵引电机的转速,可以有效解决齿轮箱渗油问题,通过调整控制参数解决齿轮箱渗油是一个比较新颖的思路。随着我国高速列车运行速度逐渐提高,齿轮箱齿轮转速也相应提高,会导致箱体内出现分布不均匀的润滑油气压而引起箱体泄漏现象,因此关于箱体的密封措施还需优化以适应更高速状态下齿轮箱的密封。

箱体渗油受到箱体材料、齿轮传动比、电机转速等影响,采用迷宫密封设计、优化铸造工艺、改变齿轮传动比及电机转矩是解决箱体渗油故障的有

效措施,但由箱体裂纹而导致的渗油故障还需从箱体自身振动特性入手解决,避免箱体出现振动疲劳裂纹、保证箱体的使用寿命是最理想的状态。

3.3 齿轮传动失效

齿轮箱齿轮是影响齿轮箱使用寿命的另一重要因素,在齿轮失效机理方面国内外学者均做了一定的研究且取得阶段性的成果。URAL A 等^[38]运用线弹性断裂力学、有限元方法和边界元法等,研究了螺旋锥齿轮裂纹的形成机理和扩展行为,为齿轮裂纹故障在线诊断开辟了新的途径。针对齿轮接触疲劳失效和时变载荷变化的交互作用问题,OAMAN T 等^[39]构建了三维动态齿轮模型,有效描述了齿轮裂纹形成与扩展行为,分析了齿廓修形对其失效风险的影响。JIA S 等^[40]建立了有 26 个自由度的两级直齿圆柱齿轮动力学模型,运用有限元分析方法计算齿轮在正常、点蚀等缺陷下的啮合刚度,采用动力学仿真分析表明,依据调幅和调频的连续时间平均振动信号可以区分齿轮点蚀和裂纹故障。NOJIMA K^[41]认为渗碳使斜齿轮的齿宽端处的硬化层深度增大,该硬化层可能会导致大螺旋角的斜齿轮弯曲疲劳强度降低,通过弯曲疲劳试验分析硬化层对齿轮弯曲疲劳强度的影响,结果表明仅用齿根应力不足以评估齿轮弯曲疲劳强度,应进一步考虑硬化层与齿根应力分布之间的关系。

国内学者俞必强等^[42]运用断裂力学、雨流计数法和 Miner 疲劳损伤累积模型预测齿轮承受交变载荷情况下的疲劳寿命,研究齿轮裂纹萌生和扩展规律并推导出疲劳寿命的计算公式,施加交变载荷更加真实反映出齿轮传动过程中的轮齿受力情况,为齿轮裂纹的疲劳寿命研究提供了新方法。王起梁等^[43]研究了某高速列车传动系统主动齿轮的接触应力和强度分布规律,预测齿轮箱传动系统使用寿命并分析其疲劳可靠性。刘东一^[44]基于地铁齿轮箱斜齿轮的实际承受载荷分析了斜齿轮裂纹扩展及寿命预测,表明齿轮裂纹类型及比例,裂纹从齿轮端面处出现向齿宽方向扩展延伸,最后预测了含有初始裂纹的齿轮寿命;影响齿轮受力因素较多,不同运行工况、不同尺寸、几何形状均会影响齿轮应力分布,该方法预测了齿轮从出现裂纹开始至疲劳失效时的使用寿命,为齿轮寿命预测提供新的方法。赵永翔等^[45]基于标准和可靠性曲线对 HXD1C 大功率机车传动系统齿轮接触和齿根弯曲疲劳可靠性开

展研究,结果表明齿轮啮合接触疲劳强度和齿根抗弯强度均符合使用要求,在置信度 95%下,齿轮抗弯疲劳强度较弱且寿命在 321.32 万公里,当期望寿命为 80 万公里时齿轮的抗弯曲疲劳仍旧较弱。

齿轮箱齿轮传动的研究通过建立齿轮传动模型,探究齿轮啮合特性以及齿轮缺陷对齿轮传动的影 响,基于齿轮缺陷的形成机理和评价方法,采取优化措施、提高齿轮传动平稳性。但在承受交变载荷工况下齿轮啮合时的接触应力和强度均在变化,服役工况下的啮合特性研究变的困难。此外,齿轮传动失效对齿轮箱体振动影响较大,如何有效避免因齿轮失效引起齿轮箱体的异常振动是技术难题,也是今后研究的重点方向。

基于高速列车齿轮箱体出现裂纹故障和西南交通大学、北京交通大学、北京铁科院等单位的研究分析结果,目前较为认可导致齿轮箱体裂纹的主要原因归结为^[49]:① 齿轮箱箱体存在 580 Hz 模态主频,与线路激扰主频 580 Hz 吻合,使列车运营时出现箱体局部共振现象;② 由于齿轮箱制造工艺的缺陷,齿轮箱体出现薄弱位置和机加工刀痕,作为初期疲劳源使箱体产生裂纹;③ 齿轮箱箱体最薄处厚度仅 9 mm,箱体的厚度对其强度的影响较大。

高速列车齿轮箱的可靠性以及寿命问题研究主要针对力学特性,借助软件以箱体强度、齿轮传动、箱体裂纹渗油等故障开展,确定诸多因素对箱体可靠性的影响方式,有助于提高箱体疲劳可靠性及使用寿命,但采用软件仿真的研究难点是如何确定计算工况与实际线路之间的相互关系,尤其是列车高速运行工况下,齿轮箱在内外耦合激励的作用下引起异常振动疲劳损伤,仍然是今后重点研究的课题。

4 高速列车齿轮箱故障诊断及监测

经过数年的迅速发展,我国高速列车的设计、生产技术及规模已达到世界先进水平,但针对列车出现的部分故障问题的解决还需探索更好的办法,虽然借助软件分析和线路实测可以确定箱体部分故障原因,但在线诊断、监测及预警手段已成为列车发展的重要趋势。

4.1 高速列车齿轮箱诊断方法

有效的故障诊断技术不仅可以早发现箱体隐患所在,而且能及时采取措施防止进一步恶化,提

高箱体服役安全性。MOYNE S 等^[47]采取边界元法和试验验证方法对汽车变速箱体开展声辐射测评,研究表明:在变速箱体上科学的布置加强筋板以改变其振动频率可以有效改善变速箱体振动响应和降低激扰力;在满足箱体使用要求的前提下布置筋板改善箱体工作性能,这种处理方法在机械设计制造领域也是一种常见的技术手段,也可作为高速列车齿轮箱的测评参考。SAIDI L^[48]也对齿轮箱的过早故障问题进行了研究,认为齿轮箱轴承故障诊断的关键工作是找到涵盖故障轴承信号的最佳频带结果,并基于信号光谱峰值法诊断齿轮箱轴承故障,采用噪声信号的研究方法是近年来齿轮箱故障诊断和振动特性研究的重要手段,但采用噪声信号诊断故障的方法容易受到周围环境因素的影响,导致其诊断结果准确度不高。艾轶博^[49]采用声发射技术监测齿轮箱箱体的损伤过程,基于 Adaboost 调整样本分布法建立退化模型以直观反映箱体的疲劳损伤变化,通过对声发射信号的分析完成箱体故障诊断,该诊断方法相对及时且误差较低,但均是在实验条件下得到的分析结果,若使其运用于高速列车齿轮箱故障诊断还需要实际实验,以证明其结果的可靠性。万国强等^[50]采用 HT 和 EEMD 方法分析高速列车齿轮箱振动响应和故障诊断,验证了这两种方法明显优于连续小波方法,结论表明有缺陷的齿轮箱振动特性会呈现出明显变化,且远高于正常齿轮箱振动特性。刘少龙^[51]通过分析高速动车组电机和齿轮箱监测系统的安装和检测布点,提出了一种齿轮箱监测系统的可行性实施方案以掌握动车组电机和齿轮箱的运行状态,为研究箱体动态特性提出了一种新的方法。张雪平^[52]研发一种可以同时进行振动激励加载和负载模拟的电磁激振齿轮箱试验台系统,该试验系统不仅克服了线路试验成本高、周期长等缺点,而且弥补了目前软件仿真分析无法体现的真实性问题。侯有忠^[53]结合机械故障诊断理论分析 CRH2 型动车组齿轮箱跑合试验台的振动响应,即能实时检测试验台的运行工况和齿轮啮合状态,又可预判齿轮箱安装方式和联轴节连接是否合理,该方法可以有效避免因安装失误导致齿轮箱体报废或试验台出现故障。邓晓宇^[54]通过分析高速列车齿轮传动系统的振动机理与动态激励,提出一种通过建立“齿轮箱振动阈值数据库”、“齿轮系统故障特征频率库”来监测齿轮箱振动响应的方

法,以实现出现故障即刻报警并预判该故障类型的功能,保障齿轮箱的安全性能,减轻工作人员的工作强度。

故障诊断有助于探明齿轮箱箱体的故障原因,为齿轮箱箱体的优化设计提供指导。高速列车齿轮箱故障诊断方法在一定程度上解决了部分故障检测,但相比基于深度学习算法的诊断技术仍有较大的提升空间,智能监测技术实时监测高速列车齿轮箱的工作状态,及时提供齿轮箱故障的预警信息,但箱体监测系统的研究也刚起步,还需大量探究和完善。

4.2 其他机械齿轮箱诊断方法

高速列车齿轮箱故障诊断的研究与其他机械系统的齿轮箱也具有较多共同点,传统的智能诊断方法在机械故障应用中也取得了一定的成果^[55],但传统智能处理方式从算法结构分析相对“较浅”存在一定的局限性,深度学习方法(deep learning,DL)的提出和成功应用于机械故障诊断有效解决了传统智能诊断技术存在的问题^[56],深度学习算法是目前研究的热点方向。陈晓玥^[57]针对经验模态分解法对滚动轴承故障特征提取误差较大的缺点,提出一种基于无失真端点极值化的经验模态分析诊断方法,该方法采用交叉取样和端点极值化方式有效改善经验模态分析的不足之处,提高了滚动轴承故障特征提取的精确度,在仿真实验中取得了较好的诊断效果。吴春志^[58]提出了一种利用一维卷积神经网络的齿轮箱故障诊断模型,经过对比测试证明了该模型对单一和复合故障的诊断准确率高于传统诊断方法。卷积神经网络是典型的深度学习方法,可以实现自动提取特征,避免了人为的提取特性信息再用模式识别方法进行分类处理,有效解决了端到端故障诊断难题。ZHANG K^[59]结合深度学习(DL)的自动提取故障数据功能和半监督学习法的高精度识别功能,提出了一种基于行星齿轮箱振动的多关联层网络框架的深度半监督新方法,经过实验数据验证表明,该方法比传统行星齿轮箱故障分类系统更加强大,而且数据标记较少。MA S^[60]针对故障诊断技术对变化运行条件下旋转机械处理的局限性,提出了一种基于时频分析和深度残差网络的数据驱动故障诊断方法对于瞬态信号,基于时频表示的概率瞬时角速度估计算法构造精确的相位函数,通过测试表明该方法对早期故障的检测精度有明显

的提高。CHEN S^[61]基于振动信号的不稳定和提取齿轮箱特征分量的局限性,通过优化原始的自适应线性调频模式(ACMD)的算法框架,结合参数化调节(PD)法和信号重采样技术,成功开发了一种改进的自适应线性调频模式(I-ACMD)分解法,该方法相比传统的时频检测方法更具有抗干扰能力,有效识别相近和微弱的振动分量,提高诊断系统的适用范围,进而大幅提高故障诊断的准确性。CHEN Y^[62]认为齿轮箱存在强背景噪声和弱故障特性,提出一种基于振动共振(VR)和耦合变稳定非线性系统的新型弱故障检测方法,通过调整系统参数变化使系统表现出单稳态、双稳态或三稳态,实现在强背景噪声的干扰下发现微弱的故障问题,由于非线性系统的耦合使系统相互依赖,所以该方法易于控制且性能更好。

可见深度学习法的应用弥补了传统智能诊断的缺点,在机械故障诊断领域应用广泛,极大提高了齿轮箱故障诊断的效率和准确率,早期检测和及时措施是保障齿轮箱使用寿命的重要手段,尽管目前高速列车齿轮箱故障研究采用深度学习法还较少,但是其他机械齿轮箱的故障诊断方法和取得的成果可以作为技术参考和指引,为高速列车齿轮箱故障诊断提供更科学的方法。

5 结束语

1) 高速列车齿轮箱通常受到内、外及耦合激励的影响,线路试验和软件仿真是目前研究高速列车齿轮箱振动特性常用的方法,通过分析激励作用下箱体的振动特性,提出优化措施,有效改善了箱体振动特性,提高其工作性能、延长使用寿命。

2) 齿轮传动、轮轨冲击是齿轮箱受到的主要内部和外部激励,齿轮缺陷、啮合冲击及车轮多边形对箱体的振动响应影响较大;齿轮传动失效、轮轨接触及车轮多边形的形成、箱体疲劳裂纹仍是高速列车齿轮箱研究面临的问题。

3) 故障诊断及监测是维护箱体服役性能的重要手段,高效的诊断和监测技术有利于掌握箱体工作状态,为后期齿轮箱体性能研究及优化提供数据支撑。

4) 高速列车齿轮箱箱体开裂问题还未完全解决,且随着列车速度的提高箱体使用寿命有下降的趋势。箱体疲劳强度的研究关键在于考虑齿轮箱所

承受的复杂动态载荷下的强度分析,真实反映齿轮箱工作状态及各零部件疲劳强度,因此仍需进一步探究。

5) 故障诊断及监测预警系统是今后重点研究课题,深度学习法在机械故障诊断领域是研究热点,将该诊断方法引用到高速列车齿轮箱的故障诊断也是趋势所在。

参考文献:

- [1] 朱海燕,游学斌,张翼,等. 高速列车齿轮箱振动特性研究进展[J]. 现代制造工程,2018,458(11):149-154.
- [2] 王文静,惠晓龙,马纪军. 高速列车设备舱支架疲劳裂纹机理研究[J]. 机械工程学报,2015,51(6):142-147.
- [3] GRANDALL S H. Random vibration[M]. New York:Technology Press of Mit and John Wiley and Sons,1958:78-156.
- [4] GRANDALL S H,MARK W D. Random vibration in mechanical systems[M]. New York:Academic Press,1963:103-126.
- [5] 姚起杭. 谈谈加速度振动试验问题[J]. 航空标准与质量,1975(6):7-18.
- [6] 姚起杭,姚军. 工程结构的振动问题[J]. 应用力学学报,2006,23(1):12-15.
- [7] HAIBA M,BARTON D C,BROOKS P C,et al. Review of life assessment techniques applied to dynamically loaded automotive components[J]. Computers& Structures,2002,80(5-6):481-491.
- [8] AYKAN M,CELIK M. Vibration fatigue analysis and multi-Axial effect in testing of aerospace structures[J]. Mechanical Systems and Signal Processing,2009,23(3):897-906.
- [9] MOON S I,CHO I J,YOON D. Fatigue life evaluation of mechanical components using vibration fatigue analysis technique[J]. Journal of Mechanical Science and Technology,2011,25(3):631-637.
- [10] ZHANG J,LI X,XIE H. Fatigue finite element analysis of certain type of EMU gearbox box[J]. Applied Mechanics & Materials,2015,789:236-240.
- [11] 李润方,陶泽光,林腾蛟,等. 齿轮啮合内部动态激励数值模拟[J]. 机械传动,2001,25(2):1-3.
- [12] ABBES M S,FAKHFAKH T,HADDAR M,et al. Effect of transmission error on the dynamic behaviour of gearbox housing[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2007,34(3):211-218.
- [13] 周建星,刘更,马尚君. 内激励作用下齿轮箱动态响应与振动噪声分析[J]. 振动与冲击,2011,30(6):234-238.
- [14] 黄冠华,张卫华,宋纾崎,等. 高速列车驱动齿轮内部动态激励影响分析[J]. 机械传动,2014,38(1):92-95.
- [15] 李广全,刘志,王文静,等. 高速动车组齿轮箱疲劳裂纹机理分析研究[J]. 2017,53(2):99-105.
- [16] 何斌斌. 高速列车齿轮箱异常振动分析[D]. 成都:西南交通大学,2014.
- [17] 李舜酩,郭海东,李殿荣. 振动信号处理方法综述[J]. 仪器仪表学报,2013,34(8):1907-1915.
- [18] 袁雨青,李强,杨光,等. 高速列车齿轮箱线路测试与异常振动分析[J]. 铁道机车车辆,2016,36(1):24-29.
- [19] 黄冠华,周宁,张卫华,等. 动态激励下高速列车齿轮传动系统振动特性分析[J]. 铁道学报,2014,36(12):20-26.
- [20] 黄冠华,王兴宇,梅桂明,等. 内外激励下高速列车齿轮箱箱体动态响应分析[J]. 机械工程学报,2015,51(12):95-100.
- [21] 钟文生,刘恒. 高速动力车承载式铸铝合金齿轮箱体结构设计及强度分析[J]. 内燃机车,1997(4):29-32.
- [22] 单巍. 高速列车新型齿轮箱箱体强度仿真与试验研究[D]. 成都:西南交通大学,2017.
- [23] 李众. 高速动车组转向架齿轮箱安装方式研究[D]. 成都:西南交通大学,2017.
- [24] 邓晓宇,张卫华. 基于刚柔耦合的高速列车齿轮传动系统动态特性研究[J]. 高速铁路技术,2016,7(4):50-54.
- [25] 刘建亮,范乃则,田华军,等. 基于 Workbench 高速动车组用驱动齿轮箱箱体强度分析[J]. 机械传动,2017,41(2):77-81.
- [26] 何章涛,马媛媛,肖攀,等. 高速客车传动齿轮箱强度和疲劳仿真分析及评价方法[J]. 机械传动,2018,42(4):130-133.
- [27] 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.
- [28] 樊红东,胡昌华,陈茂银,等. 基于退化数据的最优预测维护决策支持方法[J]. 华中科技大学学报,2009,1(37):4548.
- [29] MEEKER W Q,HAMADA M. Statistical tools for the rapid development and evaluation of high-reliability products[J]. IEEE Transactions on Reliability,1995,44(2):187-198.
- [30] CHOY F K,RUAN Y F,TU R K,et al. Modal Analysis of Multistage Gear Systems Coupled with Gearbox Vibrations[J]. Journal of Mechanical Design,1992,114(3):486-497.
- [31] 李丹. 高速列车传动齿轮箱齿轮转子动力学特性研究[D]. 大连:大连理工大学,2012.
- [32] WU H,WU P,LI F,et al. Fatigue analysis of the gearbox housing in high-speed trains under wheel polygonization using a multibody dynamics algorithm[J]. Engineering Failure Analysis,2019,100:351-364.

- [33] 王文静,张莹,曲俊生,等. 高速列车齿轮箱箱体动应力响应及疲劳可靠性研究[J]. 中国铁道科学,2018,39(6):90-97.
- [34] 曹庆峰,王立志,李琪,等. 齿轮箱箱体裂纹失效分析[J]. 金属铸锻焊技术,2008,6:134-136.
- [35] 李枫. 高速动车组齿轮箱渗油原因分析与改进[J]. 轨道交通装备与技术,2013,5(3):35-36(51).
- [36] 刘杰,刘世军,姚会君,等. 高速列车齿轮箱迷宫密封性能分析优化[J]. 润滑与密封,2018,43(5):92-98.
- [37] 张川宝,汤钰鹏. 齿轮传动比对动车组牵引特性的影响[J]. 大连交通大学学报,2011,32(4):79-82.
- [38] URAL A, HEBER G, WAWRZYNEK P A, et al. Three-dimensional, parallel, finite element simulation of fatigue crack growth in a spiral bevel pinion gear[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2005, 72: 1148-1170.
- [39] OAMAN T, VELEX P. A model for the simulation of the interactions between dynamic tooth loads and contact fatigue in spur gears[J]. Tribology International, 2012, 46: 84-96.
- [40] JIA S, HOWARD I. Comparison of localised spalling and crack damage from dynamic modeling of spur gear vibrations[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2006, 20: 332-349.
- [41] NOJIMA K, OGATA K, TANAKA M, et al. Bending fatigue strength of case-carburized helical gears (In the case of large helix angles)[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2017, 12(6): 78-81.
- [42] 俞必强,李威,薛建华,等. 基于动载荷谱的齿轮弯曲疲劳寿命预测[J]. 北京科技大学学报,2013,35(6):813-817.
- [43] 王起梁,叶小芬. 高速列车齿轮传动系统主动齿轮接触疲劳可靠性研究[J]. 机车车辆工艺,2013(1):1-4.
- [44] 刘东一,杨建伟,李欣,等. 运营工况下地铁齿轮箱斜齿轮齿根裂纹扩展路径与寿命预测[J]. 机械设计,2020,37(3):59-66.
- [45] 赵永翔,柴振华,杨冰,等. HXD1C型大功率机车传动系统齿轮的疲劳可靠性分析[J]. 机械,2013,40(11):32-34.
- [46] 长春轨道客车股份有限公司. CRH3型系列动车组齿轮箱故障情况汇报报告[R]. 长春:长春轨道客车股份有限公司,2014,6:1-20.
- [47] MOYNE S, TEBEC J L, KRAEMER J C. Source effect of ribs in sound radiation of stiffened kates[J]. Experimental and Calculation Investigation, the Acta Acustica United smart Acustica, 2000, 86(3): 457-464.
- [48] SAIDI L, ALI J B, BECHHOEFER E, et al. Wind turbine high-Speedshaft bearing degradation analysis for run-to-failure testing using spectral kurtosis[C]. IEEE, 2015: 21-23.
- [49] 艾轶博,孙畅,张卫冬. 基于性能退化和材料损伤表征的高铁齿轮箱体故障诊断[J]. 控制与决策, 2018, 33(7): 1264-1270.
- [50] 万国强,林建辉,易彩. 高速列车齿轮箱振动特性分析与故障识别方法[J]. 机械科学与技术, 2018, 37(1): 115-119.
- [51] 刘少龙. 高速动车组电机及齿轮箱监测系统的研究和应用[J]. 动力与电气工程, 2015, 6: 40-43.
- [52] 张雪平. 基于振动激励的高速列车齿轮箱可靠性试验系统研究[D]. 长春:吉林大学,2018.
- [53] 侯有忠. CRH2型动车组齿轮箱跑合试验振动数据分析与研究[J]. 轨道交通装备与技术, 2013, 5(3): 42-44.
- [54] 邓晓宇. 高速列车齿轮传动系统动态特性仿真与评价方法研究[D]. 成都:西南交通大学,2016.
- [55] TIANBO Y. A nonlinear probabilistic method and contribution analysis for machine condition Monitoring[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2013(37): 293-314.
- [56] TAMILSELVAN P, WANG P. Failure diagnosis using deep belief learning based health state classification [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2013, 115: 124-135.
- [57] 陈晓玥,耿明,陈鹏展. 一种基于 UEE-EMD 的滚动轴承故障诊断方法[J]. 华东交通大学学报, 2019, 36(5): 74-81.
- [58] 吴春志,江鹏程,冯辅周,等. 基于一维卷积神经网络的齿轮箱故障诊断[J]. 振动与冲击, 2018, 37(22): 51-56.
- [59] ZHANG K, TANG B, QIN Y, et al. Fault diagnosis of planetary gearbox using a novel semi-supervised method of multiple association layers networks[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 131: 243-260.
- [60] MA S, CHU F, HAN Q. Deep residual learning with demodulated time-frequency features for fault diagnosis of planetary gearbox under nonstationary running conditions [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 127: 190-201.
- [61] CHEN S, DU M, PENG Z, et al. Fault diagnosis of planetary gearbox under variable-speed conditions using an improved adaptive chirp mode decomposition[J]. Journal of Sound and Vibration, 2020, 468: 115065.
- [62] CHEN Y, LIANG X, ZUO M. An improved singular value decomposition-based method for gear tooth crack detection and severity assessment[J]. Journal of Sound and Vibration, 2020, 468: 115068.