

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 工程背景及研究意义

高速轨道交通系统是《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020 年）》的优先主题之一，而安全性与可靠性问题则是轨道交通研究的核心内容之一<sup>[1]</sup>。近几年在国家大力支持下，我国高速铁路蓬勃发展，很多关键性技术研究取得了丰硕成果，并逐步形成了具有自主知识产权的高速动车组车体、转向架研制与试验技术，这些研究成果使我国高速列车技术水平位于世界前列。

高速列车牵引传动系统通常由牵引电动机、齿轮箱系统和联轴器等组成。齿轮箱系统主要由两部分组成：一是由齿轮副、传动轴等组成的传动系统；二是由轴承、箱体等组成的结构系统。它是一个复杂的弹性机械系统，同时也是高速动车组十大配套技术之一。作为高速动车组牵引传动系统的关键件，齿轮箱的主要功能是将驱动电机功率按照一定的比例传递给轮对，进而带动列车运行。随着列车运行速度的提高，高速运行下列车动力学性能更易受到各种复杂因素的影响，如车轮不圆顺与钢轨耦合动力学性能的复杂化，使得高速列车振动加速度的频率范围已明显高于传统机车车辆。

通常国内动车组线路常规运营速度在 200 ~ 300 km/h，2017 年“复兴号”动车组成功实现 350 km/h 的运营速度，而更高运营速度的高速动车组正在研究中。随着动车组运行速度的提升，齿轮箱系统的运行环境将变得更加复杂，其所承受的内外载荷扰动也将对其安全稳定运行产生更大的影响。轮轨激励力将是其主要的扰动因素。动车组车轮不圆顺缺陷或线路钢轨不平顺造成轮轨耦合作用力呈现高频周期性变化会加剧轮轨间振动冲击，使齿轮箱箱体发生明显的异常振动行为，这些因素

都会直接影响齿轮箱箱体的强度，导致齿轮箱箱体出现故障<sup>[2]</sup>。齿轮箱系统位于动车的下部，悬挂于动轴上，在车辆正常运行过程中直接承受轮轨间的各种振动和冲击载荷，工作环境相当恶劣<sup>[3]</sup>。齿轮箱传动齿轮在啮合过程中，要承受长时间的循环性交变载荷、振动及冲击，导致传动齿轮出现点蚀、磨损、接触疲劳与断裂及齿轮箱箱体出现裂纹等失效现象，会进一步恶化列车转向架动力学性能。如果齿轮箱箱体出现故障，将直接威胁到齿轮箱系统运行的安全性。目前高速列车齿轮箱箱体普遍的故障形式主要包括润滑油渗漏、齿轮箱箱体内润滑油温度过高、箱体内存在异物等，而最危险的失效形式则是箱体出现裂纹，它会严重威胁着高速动车组的安全运行。

高速动车组在实际服役环境中出现的齿轮箱箱体裂纹故障是我国高速列车发展过程中出现的新问题和新挑战，而齿轮箱箱体在实际服役线路中的振动特性与其裂纹的产生有着极大关联性，且目前该问题尚处研究的初期阶段。因此，对其开展深入研究和分析具有重要的理论意义和工程实用价值。

### 1.1.1 齿轮箱故障问题

高速动车组运行于京津、武广、京沪、哈大等高速客运专线上，出现故障的齿轮箱主要是国外某品牌的 A 型和 B 型两种齿轮箱，其中 B 型结构齿轮箱已逐步更换为结构改进齿轮箱。A 型和 B 型齿轮箱如图 1-1 所示。

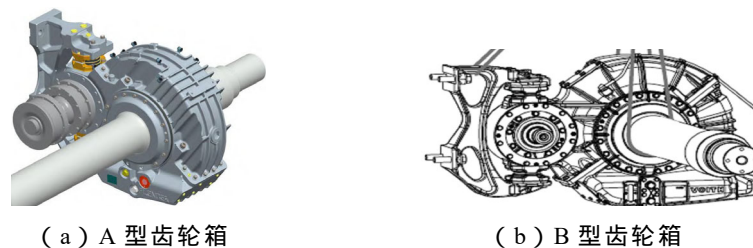


图 1-1 故障齿轮箱类型

针对动车组齿轮箱的故障现象，对故障齿轮箱开展较为详细的调研分析，总结出齿轮箱的故障类型如下：

A 型齿轮箱故障的主要类型： 润滑油乳化； 齿轮箱漏油问题

普遍存在，其中，电机侧渗油约占 64.3%，车轮侧渗油约占 35.7%；  
润滑油黑油； 内部异物； 齿轮箱输出端轴承故障。

B 型齿轮箱故障的主要类型： 原结构齿轮箱箱体裂纹故障；  
箱体内部异物； 润滑油颜色发黑； 齿轮箱输出端轴承故障；  
防水挡圈脱出问题。

通过比较发现 A、B 型齿轮箱故障在结构上存在明显差异；A 型齿轮箱故障主要问题表现为渗油和油脂乳化；B 型齿轮箱故障主要问题表现为齿轮箱箱体强度不足导致箱体出现裂纹。其中最严重的是齿轮箱箱体裂纹故障问题，一旦出现裂纹就意味着齿轮箱功能失效，严重威胁动车组的安全运行。

### 1.1.2 齿轮箱故障分析

#### 1. 齿轮箱箱体内部异物<sup>[4]</sup>

##### 1) A 型齿轮箱内部异物案例分析

(1) 某型高速动车组齿轮箱在更换润滑油时，发现齿轮箱油位观察孔位置附着白色颗粒物质，经现场确认认为组装过程中白色泡沫保护挡板脱落的颗粒。

(2) 某型高速动车组齿轮箱在库内做二级修，排油过程中发现有铁丝状金属异物。案例如图 1-2 所示。



图 1-2 A 型齿轮箱内部异物

##### 2) B 型齿轮箱内部异物案例分析

(1) 某型高速列车齿轮箱温升异常故障：动车组限速 140 km/h，报警温度 160 °C，齿轮箱分解后发现大量铝屑。

(2) 某型高速列车齿轮箱在日检时防水挡圈脱出，齿轮箱分解后发现纸片。

(3) 某型高速列车齿轮箱温升异常故障：动车组限速 140 km/h，报警温度 146 °C，齿轮箱分解后发现铝片。案例如图 1-3 所示。



图 1-3 B 型齿轮箱内部异物

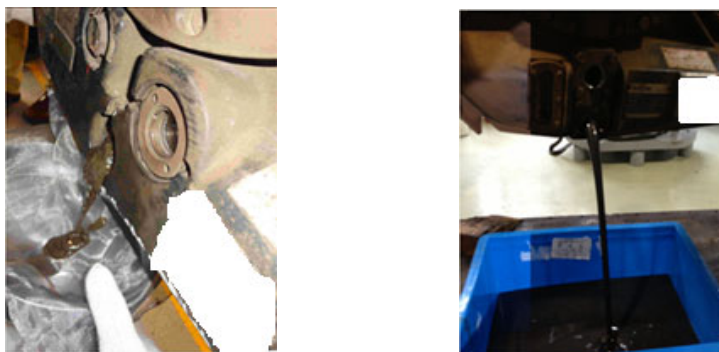
### 3) 齿轮箱内部异物影响

齿轮箱内部异物对润滑油的品质会造成极坏的影响，同时会造成齿轮箱润滑油路流通不畅，严重时可能导致油路阻塞，使得轴承因润滑不充分发生热轴报警故障。此外，齿轮箱内部存在的金属异物会加速齿轮箱旋转件磨损，导致轴承损坏，性能失效。

## 2. 齿轮箱润滑油变黑

### 1) 润滑油变黑案例分析

导致润滑油变黑的根本原因是齿轮箱润滑油产生氧化反应。A、B 两种型号齿轮箱润滑油变黑现象如图 1-4 所示。此外，根据对齿轮箱润



A 型齿轮箱油黑色黏稠

B 型齿轮箱润滑油发黑

图 1-4 齿轮箱润滑油发黑

滑油异常油样的检测发现：齿轮箱内发黑的润滑油中铁含量基本偏高。这表明齿轮箱内部存在异常磨损。同时对润滑油发黑的齿轮箱进行分解检查，发现齿轮箱内确实存在异常磨损现象。

#### 2) 润滑油发黑原因简析<sup>[4]</sup>

(1) 在对 A 型润滑油发黑的齿轮箱分解检查中，发现数起 FAG 圆锥滚子轴承保持架偏磨故障。

(2) 在对 B 型润滑油发黑的齿轮箱分解检查中，发现多起圆锥滚子轴承内圈与车轴松脱打滑，故障特征如图 1-5 所示。



A 型齿轮箱轴承保持架偏磨



B 型齿轮箱轴承内圈与车轴打滑

图 1-5 滚动轴承故障

对润滑油发黑的齿轮箱分解检查后得到如下信息：

(1) 根据润滑油检测结果，润滑油发黑与 Fe 含量有显著的关联性。

(2) A 型齿轮箱润滑油发黑且 Fe 含量超过  $350 \times 10^{-6}$ ，轴承保持架存在偏磨故障。

(3) B 型齿轮箱润滑油发黑且 Fe 含量超过  $200 \times 10^{-6}$ ，部分轴承存在问题。

### 3. B 型齿轮箱箱体强度问题

针对齿轮箱出现裂纹导致漏油的情况进行调研统计分析，发现只有 B 型齿轮箱箱体存在裂纹故障；对所有齿轮箱裂纹部位检查后发现，裂纹

均发生在齿轮箱箱体的上部齿面观察孔和下部油位观察孔周围。

对裂纹位置统计得出，52%的裂纹出现在齿轮箱的上箱体，48%的裂纹出现在齿轮箱的下箱体，如图 1-6 所示。

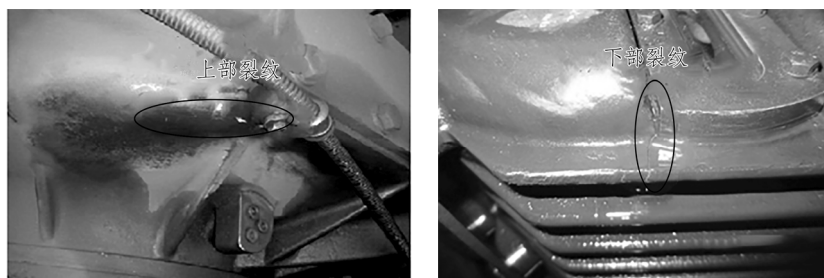


图 1-6 高速动车某齿轮箱箱体裂纹位置

齿轮箱箱体产生裂纹原因分析：

基于齿轮箱箱体的模态计算和线路试验测试结果，发现 B 型齿轮箱箱体存在以下现象： B 型原结构齿轮箱存在 580 Hz 模态主频，与线路扰动主频 580 Hz 吻合，导致列车运营时出现箱体局部共振现象； B 型原结构齿轮箱箱体的铸造及机加工质量存在缺陷； B 型原结构箱体最薄处的厚度仅为 9 mm，而 A 型箱体最薄处的厚度为 12 mm，箱体厚度对其强度的影响很大； 对 B 型原结构齿轮箱箱体材料及断口进行测试，结果表明：断面上存在可见气孔。通过宏观观察，齿轮箱裂纹起源于箱体的内表面，裂纹以疲劳方式扩展直至开裂。试验分析如图 1-7 所示。

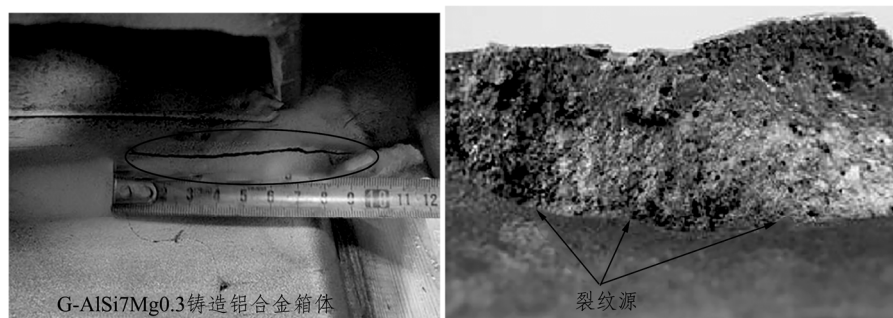


图 1-7 齿轮箱箱体开裂微观分析

高速列车齿轮箱箱体出现裂纹，在国外也有案例：日本新干线高速列车齿轮箱出现过箱体断裂，导致齿润滑油全部漏光并露出大部分齿轮的重大事故，如图 1-8 所示。目前我国高速动车组的运营速度已经达到 350 km/h，随着更高速动车组技术的发展，其后期运营速度的不断提升，动车组各个部位的服役环境将会更加复杂，齿轮箱箱体的工作环境也将变得更加恶劣，高速动车齿轮箱箱体将会面临安全运营上的严峻挑战。



图 1-8 日本新干线某高速列车齿轮箱开裂故障

目前国内对于高速动车组齿轮箱箱体出现裂纹导致其失效的原因尚处初期研究阶段，对于齿轮箱箱体在实际服役线路中的动态振动行为特性及动应力对其造成的损伤鲜有系统性的研究报道。本书在对某型高速动车组齿轮箱箱体裂纹等故障系统调研的基础上，基于线路试验、台架试验、刚柔耦合动力学仿真计算及有限元分析法，深入重点开展齿轮箱箱体在高速动车组整车振动环境下的动态振动特性及其疲劳失效研究。

## 1.2 国内外研究现状

齿轮传动系统是高速动车组动力转向架的核心部件，其功能是将牵引电机的输出动力传递给轮对，其动态性能将直接影响动车组运行的安全可靠。因此，研究齿轮传动系统的振动特性对于保障机械设备的正常运营具有重要意义。国内外学者为此进行过大量研究，这些研究主要

集中在齿轮箱系统动态激励、齿轮箱系统振动稳定性和非线性振动特性等方面，采用的研究方法主要有解析方法、数值方法、实验方法、传递矩阵法、有限元法和模态分析法等。

由于高速列车齿轮系统故障一般都伴随着相应振动状态的恶化，因而齿轮箱箱体的振动特性在很大程度上表征了其运行状态的好坏。国内外学者对这种动态激励下的齿轮传动系统振动特性进行过相关研究，本节从高速列车齿轮箱传动系统的动态激励特性研究现状和高速列车齿轮箱疲劳失效及可靠性研究现状两方面展开论述。本书的研究领域是高速动车组工程实际运用问题，相关研究学者出于技术保密及商业保密的需要，没有将最新的研究成果公开发表，因此本书缺少近几年的研究参考文献，特此说明。

### 1.2.1 高速列车齿轮箱振动特性研究现状

随着高速列车运行速度不断提高，列车各部件的工作环境急剧恶化，齿轮传动系统在传递动力的过程中长期处于高速、复杂外载荷的运行条件下，因此齿轮传动系统的动态特性及失效机理与齿轮箱系统所受的内外激励及动态响应关联紧密。

齿轮箱是高速列车齿轮传动系统的载体，在列车高速运行中主要承受以下的激励载荷：一是轨道不平顺和车轮磨耗等原因造成轮轨冲击的外部激励，这些激励通过轮对传递到齿轮箱；二是牵引电机转轴形成谐波转矩的外部激励；三是齿轮啮合刚度变化造成的周期性振动的内部激励，通过传动轴传递给齿轮箱<sup>[5][6]</sup>。在这些激励耦合作用下，齿轮箱承受复杂的交变载荷，而且高速列车齿轮箱是一个闭式的传动系统，很难直接测得齿轮啮合的时变特性。因此，高速列车齿轮箱的工作状态至今还很难确定，所以目前主要基于上述三种激励载荷而开展齿轮箱的振动特性研究工作。

#### 1. 外部激励对齿轮箱振动特性的影响

齿轮箱长期处于复杂交变载荷作用下，因此齿轮传动动态特性及失效机理与齿轮箱系统所受到内外激励密切相关。高速列车齿轮箱强度校



核最基本的方法是采用单一外载荷，对高速列车齿轮箱而言，外载荷主要是轮轨激励和电机输入激励<sup>[7]</sup>。

姚远、任少云等<sup>[8][9]</sup>从铁路车辆和轮式车辆的角度定义了滑动率的概念，认为轮对黏滑振动与轮对纵向振动耦合作用下的轮轨切向力变化是导致轮轨自激振动形成的主要原因。基于多体动力学和自动控制理论建立黏滑控制模型，再现黏着条件降低时轮对黏滑振动现象，同时分析了自激振动引发构架、电机和齿轮箱部件等系统共振现象。张卫华等<sup>[10]</sup>通过 1:1 的实物模型研究了高速轮轨黏着机理试验，并研究了轮轨表面黏着系数与蠕化率的关系及黏着系数与运行速度的关系。通过研究黏着系数，为车轮多边形磨耗的研究奠定了基础。

Nielsen 等<sup>[11][12][13]</sup>对车轮多边形磨耗进行了归类，并提出多边形磨耗所导致的振动问题。Meinders 等<sup>[14][15]</sup>指出车轮非圆化的振动会传递至车体，导致振动噪声。Johansson 等<sup>[16]</sup>研究了 1~20 阶车轮不圆的发展状态及不同阶次轮轨系统的振动特性。刘道远<sup>[17]</sup>研究了车轮非圆化对轮轨系统动力学性能的影响，分析发现轮轨振动的成分非常复杂，而且非圆化车轮对轮轨间作用力的影响很大。李广全等<sup>[18]</sup>基于高速铁路线路服役试验获得典型工况下轴箱、齿轮箱箱体的振动加速度信号及表面的动应力响应，结果表明：直线运行工况下轮轨激励引起的齿轮箱箱体振动频率与其固有频率产生交集，齿轮箱箱体产生局部共振，使得齿轮箱箱体局部产生较高的动应力幅值，最终导致箱体出现裂纹。常程城<sup>[19]</sup>通过实际的线路测试，研究轮轨激励对齿轮箱的影响，发现车轮的 20 阶不圆顺的振动频率 586 Hz 与齿轮箱的固有频率很接近，从而引起齿轮箱箱体共振，这可能是齿轮箱箱体开裂的原因之一。

目前关于电机谐波转矩对齿轮箱振动影响的研究较少。吴志敢等<sup>[20]</sup>研究发现，在实际应用中异步电动机定子电压的磁场并非完全正弦，其中有较多的高阶谐波。赵怀耘等<sup>[21]</sup>研究发现，电机的谐波振动对机车的动力学影响甚微，但是在做驱动传动装置的动力学分析时，应该将电机谐波转矩考虑在内。单独研究电机谐波转矩对高速列车齿轮箱振动特性的并不多，大多是在多方激励共存的情况下考虑电机谐波。

赵春等<sup>[22]</sup>在分析高速列车齿轮箱振动特性的基础上，对其开展了振动模态和线路跟踪试验测试分析。结果表明：从轴箱到齿轮箱的振动传

递存在放大现象。当运营速度接近 300 km/h 时，齿轮箱的振动加速度会急剧上升，通过频谱分析发现齿轮箱异常振动的根本原因可能是轮轨高频激励传递到齿轮箱上导致结构共振现象。

黄冠华等<sup>[23]</sup>利用有限元方法及建立考虑齿轮啮合的高速列车动力车整车动力学模型研究了高速列车齿轮箱系统动态特性。研究显示：齿轮传动系统中存在谐波振动，扭矩波动不仅会增大齿轮的角加速度和啮合力，还会使齿轮箱的振动加剧，并改变系统的振动主频，可能引发共振现象。

邓晓宇<sup>[2]</sup>基于 ANSYS 和 SIMPACK 建立了考虑齿轮箱箱体为柔性的刚柔耦合高速动车整车动力学模型，对比分析柔性箱体与刚性箱体的动态响应特性及其对车辆整车动力学性能的影响，并探讨了车轮多边形与箱体共振关系。

杨广雪等<sup>[24]</sup>为研究高速列车齿轮箱箱体在轮轨激励下的振动特性，基于武广客运专线试验，获得齿轮箱箱体在新轮和磨耗轮状态下的振动特性。结果表明：新轮状态下箱体振动加速度幅值要高于磨耗轮，说明磨耗轮在一定程度上能改善箱体的振动特性。

外部激励对齿轮箱振动特性影响研究表明，轮轨激励对齿轮箱的振动影响较大，特别是车轮不圆顺产生的振动频率与齿轮箱的固有频率很接近，有可能会引起齿轮箱的共振，所以轮轨的外部激励对齿轮箱箱体振动影响很大。因此，本书重点研究轮轨激励下齿轮箱箱体的振动特性。

## 2. 内部激励对齿轮箱振动特性的影响

李润方、王建军和林腾蛟<sup>[25][26]</sup>等人对齿轮啮合的时变刚度激励、误差激励和啮合冲击激励进行模拟，采用非 Hertz 接触有限元模型，研究齿轮弯曲、剪切和接触等各种变形及相对应的应力状态，以及齿轮传递误差对啮合刚度的影响，为研究齿轮箱内部激励对箱体的振动特性影响奠定基础。Abbes 等<sup>[27]</sup>研究齿轮与箱体的相互作用，建立了基于动态子结构法的斜齿圆柱齿轮副及箱体的动力学模型，该模型包含了斜齿圆柱齿轮啮合面弹性效应的 6 自由度模型。Chaari 等<sup>[28]</sup>通过对行星齿轮传动装置建立动力学模型，在时域、频域及基于 Wigner-Ville 分布的时-频联合域对比分析了齿轮在正常啮合和齿面点蚀、裂纹缺陷等工况下的动力

学响应。Ebrahimi 等<sup>[29]</sup>通过建立刚-柔混合的齿轮接触模型来研究齿轮的接触力，并考虑了齿隙非线性、制造误差和不同齿侧啮合等因素对接触力的影响。范军等<sup>[30]</sup>研究了车轮啮合的典型振动特性对齿轮箱的影响，发现齿轮啮合的高频特性会加剧齿轮箱振动。

为了分析齿轮内部动态激励对高速列车结构振动的影响，张卫华等<sup>[31]</sup>采用有限元方法，建立考虑齿轮内部动态激励的高速列车动车非线性动力学模型，发现齿轮内部动态激励对车体和构架的振动基本没有影响，但对电机和齿轮箱的垂向振动有较大影响。这种方法很好地体现了内部动态激励对车体和构架的振动影响，但其考虑的是刚体模型，对刚柔耦合模型没有进行深入分析。

为了分析某动车组齿轮箱振动特性及其影响因素，金思勤等<sup>[32]</sup>对某动车组齿轮箱进行加载试验并对齿轮箱试验过程中出现的故障进行了诊断研究，其研究表明：随着转速的增加，齿轮箱各位置振动速度有效值呈增大趋势；随着扭矩的增加，齿轮箱振动速度有效值呈减小趋势，试验台组装中各相邻两轴的对中误差对试验过程中齿轮箱的振动有很大的影响，可能引发齿轮箱故障。

Wang<sup>[33][34][35]</sup>以金属齿轮和非金属齿轮为研究对象，采用有限元法开展了轮体、轮齿和轴对轮齿啮合刚度影响的研究。在此基础上，Zhang<sup>[36]</sup>深入考虑了齿廓修形和不对中下轮齿啮合刚度的影响。Cai<sup>[37]</sup>针对斜齿轮传动，考虑齿数、轴偏心和齿顶隙系数等对轮齿啮合刚度影响，并提出了一种新的刚度计算函数与实验结果进行验证。

因为高速列车齿轮箱内齿轮啮合的振动特性难以直接测量，所以大多数研究均采用数值仿真的方法，而且目前大多数研究都集中在齿轮啮合方面。根据研究表明，齿轮啮合时产生的高频振动特性，会加剧齿轮箱的振动，但目前单独研究齿轮啮合对齿轮箱振动特性影响的并不多，因为应用单个激励对高速列车齿轮箱进行校核并不能反映出齿轮箱的实际动态响应。

### 3. 内外耦合激励对齿轮箱振动特性的影响

由于高速列车齿轮箱独特的工作环境，目前大多数研究都集中在多激励耦合的情况下进行研究。黄冠华等<sup>[23]</sup>通过建立高速列车整车齿轮传

动模型，通过动力学仿真得到高速列车的扭矩波动会引发齿轮传动系统的谐波振动，使得齿轮副的动态响应变大，加剧齿轮箱的振动；并通过黏滑振动描述负载转矩的变化，轮轨间的滑动会使齿轮啮合力及齿轮箱箱体振动急剧增加。王红岩等<sup>[38]</sup>基于虚拟样机技术建立了变速箱箱体刚柔耦合虚拟振动试验台模型，能够在给定的激励条件下获得箱体相应的动应力历程。王炎等<sup>[39]</sup>根据虚拟样机模型建立了齿轮箱刚柔耦合系统，实现了刚柔耦合仿真，并验证了模型的合理性与准确性。黄冠华等<sup>[40]</sup>建立了考虑齿轮啮合的整车动力学模型，外部激励采用武广线路谱的时域不平顺样本，研究在内外耦合激励下高速列车齿轮箱的动态响应，并通过齿轮箱箱体有限元模型算出其动应力数值。

为了分析高速列车齿轮箱在内外耦合激励下产生的剧烈振动特性，丁康<sup>[41]</sup>、赵广<sup>[42]</sup>、朱革<sup>[43]</sup>在齿轮箱故障振动频带特性方面做了大量研究，得到的研究结论接近，即齿轮箱对不同的故障形式具有不同的振动特性。虽然以上研究的对象是针对一般的齿轮箱系统，但为高速列车齿轮箱故障研究奠定了基础。

通过研究内外耦合激励对高速列车齿轮箱振动特性的影响，发现齿轮啮合、电机谐波、轮轨激励中均含有激励齿轮箱共振的频率特性。黄冠华、张卫华等<sup>[23][40]</sup>的研究已经充分展示出多耦合激励共存条件下齿轮箱的振动特性。但是，对于齿轮箱箱体的振动特性，因为不同线路和不同列车均存在差异，所以需要采集更多的试验数据样本进一步开展研究。

### 1.2.2 高速列车齿轮箱疲劳失效及可靠性研究现状

#### 1. 高速列车齿轮箱疲劳破坏研究现状

疲劳破坏是构件的主要失效形式之一，学者们很早就发现在结构疲劳破坏中交变载荷频率与结构的某一阶或某几阶固有频率相同或相近时，结构会发生共振，此时相同的激励幅值将会产生更大的响应，从而加速产生疲劳破坏，这种因共振而导致结构失效的行为称为共振疲劳<sup>[44]</sup>。1958年，Crandall<sup>[45]</sup>将随机振动理论应用于结构疲劳研究中，但是随机振动理论仅对使结构发生共振的一定激励有效，对于交变载荷等复杂问题并没有提出很好解决方法。1963年，在随机振动理论上，Crandall<sup>[46]</sup>

首次将振动疲劳描述为在交变载荷激励下产生的一种不可逆的且具有损伤累积性质的振动疲劳，这也是首次在振动疲劳研究中引入交变载荷激励的概念，为后来研究结构疲劳破坏提供了非常有价值的理论基础。20世纪70年代末，姚起杭<sup>[47]</sup>提出了振动疲劳的新型概念，随后与姚军<sup>[48]</sup>将结构的疲劳分为静态疲劳与振动疲劳两类问题开展研究，很好地解决了一些工程结构的振动问题。Aykan等<sup>[49]</sup>的研究表明振动疲劳分析应考虑外部激励的动态特性及结构的主频响应。工程应用中将振动疲劳分为共振疲劳和非共振疲劳，共振疲劳并非经常表现为结构整体共振，更多的是部件共振或局部共振。交变载荷激励经常发生结构局部共振大应变及应力集中，导致有缺陷的部位发生疲劳损伤引起断裂，疲劳破坏是结构局部共振与应力集中两种因素的共同作用<sup>[50]</sup>。

目前，高速列车疲劳主要是通过建立多轴疲劳损伤模型进行分析，该模型有3类<sup>[51]</sup>：复杂应力状态下静态屈服理论向疲劳理论的延伸；

基于能量的方法；采用“临界面”法。Findely首次提出了临界面概念，Mediarmid和Brown-Miller等对其进行了深入研究。临界面法疲劳损伤模型有正应变模型、Brown-Miller模型、Bannantine模型和Wang-Brown模型等，其中Brown-Miller模型同时考虑了剪应变和正应变，能适用于大多数金属结构。李广全等<sup>[18]</sup>对齿轮箱箱体的典型工况振动特性进行模态分析，结果表明：列车高速直线运行时，轮轨激励引起的齿轮箱振动频率与其固有频率产生了交集，齿轮箱产生局部共振导致产生较高的动应力幅值，使得箱体出现裂纹。何斌斌<sup>[52]</sup>采用Hibert-huang变换的时频法<sup>[53]</sup>，参照传统齿轮振动特性，对高速列车齿轮箱箱体信号进行分析，得出齿轮箱箱体产生裂纹的主因是：车轮不平顺的激扰力使齿轮箱箱体局部振动频率与其固有频率相同或相近，引发共振，且高速列车的振动特性存在非线性振动特性。

综上所述，研究如何利用振动方法来进行疲劳损伤诊断，并克服车轮不平顺的激扰力使齿轮箱箱体局部振动频率与其固有频率相近的问题是结构抗疲劳设计的重要思想。

## 2. 高速列车齿轮箱强度分析

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及有限元

模型进行强度分析,强度校核通常借鉴构架等相关试验标准。钟文生等<sup>[54]</sup>提出了高速动力车承载式铸铝合金齿轮箱的结构特点及设计原则,用有限元法分析箱体强度,该设计具有一定的合理性,但是从列车实际运行过程中时变性很强的动态受力情况分析,该设计还有待优化。在铁路车辆齿轮传动系统研究中,对于齿轮啮合时变特性的影响考虑较少,齿轮箱强度校核研究也大多基于单一的外荷载,很难反映出齿轮箱在高速运行时的动态载荷以及动态载荷作用下齿轮传动系统振动失效问题。杨文硕等<sup>[55]</sup>利用有限元方法中实体单元与平板壳单元相结合,建立结构力学中齿轮箱箱体分析模型,研究铸铝合金减速箱体的结构强度和刚度。

单巍<sup>[56]</sup>开展了新型齿轮箱箱体结构设计、强度及模态仿真分析,利用 HyperMesh 软件对齿轮箱进行网格划分,再用 ANSYS 有限元对箱体静强度和疲劳强度进行仿真分析,得出该箱体在材料 Goodman 疲劳极限内,箱体的疲劳强度满足要求。刘建新<sup>[57]</sup>使用有限元分析软件 Workbench 对箱体模型进行强度分析研究,分析了短路工况以及启动工况的受力情况,并开展了综合评估。

Lotfi<sup>[58]</sup>对齿轮箱存在过早故障问题开展研究,得到齿轮箱轴承故障诊断的关键是找到涵盖故障轴承信号的最佳频带的结果,并开展了基于平方的信封光谱峰度方法诊断。董宏等<sup>[59]</sup>基于齿轮啮合力学模型,利用频谱分析法对机车齿轮箱异常振动开展故障诊断,得到齿轮箱异常振动的原因与实际情况一致。潜波等<sup>[60]</sup>利用传递矩阵法建立多轴系统模型,针对不同的模型采用不同的传递矩阵方法,建立场传递矩阵、点传递矩阵、载荷模型、阻尼模型和齿轮啮合模型等,然后建立多回转轴系模型,在轴的两端施加边界条件,得到的数学模型可用于传动系统的强迫振动和自由振动研究。

袁文东<sup>[61]</sup>通过对齿轮箱在纵向、横向和垂向振动加速度的测量,对齿轮箱在三个方向的振动特性开展研究,对高速动车组的齿轮箱进行了疲劳强度校核,求得其在标准载荷下的动态响应,并对其振动能量、速度、频率开展研究,得到速度越快其振动能量就越大的结论。

Wilk 等<sup>[62]</sup>通过建立齿轮箱的有限元模型,发现增加加强筋可以有效地减少齿轮箱的振动,对齿轮箱的振动稳定性和强度会产生有利影响。袁雨青等<sup>[63]</sup>通过线路实际测试,得到齿轮箱的振动加速度,并对数据进

行相关性分析。结果表明：车轮 20 阶磨损产生的振动与齿轮箱固有频率接近，易引起齿轮箱共振。Zhang 等<sup>[64]</sup>认为导致高速列车齿轮箱失效的主要原因是疲劳破坏，并对齿轮箱进行了疲劳强度校核。Hu 等<sup>[65]</sup>通过线路测试、仿真计算等方法，对相关数据开展时域、频域、时频及齿轮箱疲劳强度分析，并建议对齿轮箱进行改进设计避免与轮轨激励产生共振。孟永帅等<sup>[66]</sup>以动车某齿轮箱箱体为研究对象，通过有限元计算和锤击法试验分别得到了齿轮箱箱体的模态频率及振型，通过相关性分析，验证了齿轮箱箱体仿真模型的有效性和计算结果的准确性，该研究为减少样机试验奠定了较好的基础。

齿轮箱长期处于复杂的交变载荷作用下，因此研究齿轮传动动态特性及失效激励因素与齿轮箱系统所受到内外激励密切相关，所以考虑内外耦合激励方式是研究齿轮箱疲劳失效比较有效的方法之一。

### 3. 高速列车齿轮箱可靠性及寿命分析

研究齿轮箱疲劳失效是为了确保其运行安全可靠性及预测其使用寿命。高速齿轮箱箱体具有承受动载、冲击剧烈、承受外界激励、结构复杂紧凑、运动副发热量大、温度升高快等显著问题，这些问题均会严重影响齿轮箱中齿轮、轴承及箱体本身的使用寿命，如何有效处理好上述问题是提高齿轮箱性能及使用寿命的关键。对于不同型号的高速列车以及列车行驶线路的不同，轮轨接触均呈现出差异性<sup>[67]</sup>，在各种激励的耦合作用下，齿轮箱要承受异常复杂的交变应力。而且高速列车齿轮箱的传动系统是一个闭式传动系统，很难直接测得齿轮啮合的时变特性，使得研究人员难以确定高速列车齿轮箱的振动特性，对其可靠性及寿命分析就显得困难重重。

基于该背景，国内外学者开展了很多关于齿轮箱可靠性及寿命的研究。蒋喜等<sup>[68]</sup>阐述了处理性能退化数据的 3 种方法，并根据 GJB-899A 可靠性试验验收标准设计性能退化试验，根据相关标准和经验来确定伪寿命，利用伪寿命建立威布尔分布的可靠度函数。樊红东等<sup>[69]</sup>采用 Bayes 方法，通过性能退化数据建立退化曲线，用退化方程计算齿轮剩余寿命，为计算齿轮箱齿轮的使用寿命提供了可借鉴的有效方法。Meeker 等<sup>[70]</sup>介绍了故障类型的分类，指出性能退化和失效之间的关系、性能退化数据研究方法的优点，并根据 Paris 模型介绍了齿轮箱性能退化研究的概