

摘 要

动车组是城际和市郊铁路实现小编组、大密度的高效运输工具。转向架是高速动车组的走行装置，决定了列车运营速度和运行品质。动车组转向架轴承的工作状况是影响铁路运输安全的重要因素之一。因此，开展动车组转向架轴承可靠性分析与故障诊断的研究，对保证运营安全、提高维修效率和避免不必要的损失等都具有重要的意义。

本文应用故障树分析法建立了动车组转向架轴承故障模型，并提出了提高其可靠性的要求，并简要介绍了动车组转向架轴承振动机理、故障特征频率等。在轴承故障的监测技术中，本文利用振动监测技术监测动车组转向架轴承，并深入研究了故障诊断领域比较先进的理论与方法。

本文采用两种方法对轴承故障进行诊断和监测。一种是时频域参数指标诊断方法，另一种方法是：智能诊断方法，先对振动信号进行小波包消噪提高其信噪比，再采用基于 EMD(经验模态分解)的方法来提取轴承故障特征，把故障信号分解得到 IMF，对几个重要的 IMF 进行分析，获得每个 IMF 分量的能量，作为 BP 神经网络的输入向量；根据遗传算法寻优的特点，结合改进遗传算法对 BP 神经网络的参数进行优化，再利用其对轴承的故障进行诊断，分析了该方法诊断的效果。

系统是以软件为核心的虚拟仪器开发，使得系统具有扩展性强、灵活定义、性能高和维护费用低等优势。系统软件开发的流程平台使用 LabWindows/CVI 并在实验中，证实了动车组转向架轴承故障诊断系统能准确的预测其故障并提供合理的维修建议。

关键词：动车组转向架轴承，可靠性分析，EMD, BP神经网络，改进遗传算法

目 录

绪 论.....1.....

第 1 章 动车组转向架轴承故障分析与可靠性模型的建立..... 2.....

 1.1 动车组转向架轴承结构.....2.....

 1.2 动车组转向架轴承可靠性研究概述..... 3.....

 1.3动车组转向架轴承的故障树分析 4.....

 1.3.1故障树原理介绍 4.....

 1.4 动车组转向架轴承可靠性模型与故障树..... 6.....

 1.5 可靠性提高的措施..... 11.....

 2.1 动车组转向架轴承故障诊断的基本内容..... 13.....

 2.2 动车组转向架轴承故障监测常用技术..... 13.....

 2.3 机车车辆轴承故障机理分析..... 15.....

 2.3.1 动车组转向架轴承缺陷产生的特征频率..... 16.....

第 3 章 转向架轴承故障诊断相关理论的研究..... 18.....

 3.1 时频域参数指标诊断方法..... 18.....

 3.2 基于小波变换的轴承故障诊断方法..... 20.....

 3.3 基于 EMD 的时频分析的轴承故障诊断方法..... 21.....

第 4 章 转向架轴承诊断系统设计..... 22.....

 4.1 轴承故障诊断系统的硬件集成..... 22.....

 4.2 机箱..... 22.....

 4.2.1 加速度传感器..... 23.....

 4.3 车组转向架轴承故障诊断系统的软件的研究..... 25.....

 4.3.1 软件的设计..... 26.....

 4.3.2动信号的采集 27.....

第 5 章 总结与展望 29.....

 5.1论文总结 29.....

 5.2下一步工作 30.....

参考文献..... 错误!未定义书签。

绪 论

动车组是城际和市郊铁路实现小编组、大密度的高效运输工具，以其编组灵活、方便、快捷、安全，可靠、舒适为特点备受世界各国铁路运输和城市轨道交通运输的青睐。动车组在我国投入运营，标志着中国进入高铁时代。根据铁道部相关人员表述，到 2012 年，我国建成了 1.3 万公里“四纵四横”高速客运专线，其中时速 350 公里的线路达到 8000 公里，时速 250 公里的线路达到 5000 公里，时速 350 公里的高速动车组将成为未来铁路客运专线的主力。转向架是高速动车组的走行装置，具有承载、减振、导向、牵引和制动等重要功能，决定了列车运营速度和运行品质。动车组转向架轴承一般为滚动轴承，是动车组中工作条件最为恶劣的部件，在动车运行中，它起着承受载荷和传递载荷的作用。在铁路高速重载的运营条件下，动车组转向架轴承一旦发生故障，故障会发展很快，若及时发现，会导致热轴、燃轴、切轴等事故的发生。因此需要对其进行可靠性分析与故障诊断，以保证安全、可靠、有效、经济的完成旅客和货物的运输任务。滚动轴承故障的准确诊断可以减少或杜绝事故的发生，最大限度地发挥轴承的工作潜力，节约开支，对高速列车的安全运行具有重大意义。这也意味着当今对动车组转向架轴承要求高速化、轻型化的同时，还要求具有维修周期长、高寿命、运行可靠等性能，动车组转向架轴承比较容易出现故障，如何快速、准确、实时进行在线可靠性分析与诊断轴承故障就显得日益重要。对动车组转向架轴承进行可靠性分析与故障诊断的目的在于：

(1) 对动车组转向架轴承的各种失效的征兆作出正确地判断，在失效发生前采取措施，杜绝重大事故的发生，保证动车的安全运行。

(2) 通过在线监测、可靠性分析、故障诊断等，为设备结构的完善、设计的优化、工艺的改进以及合理的维修制度提供数据和信息。

(3) 保证设备可以发挥最大限度的工作潜力，能预知维修并能视情维修，延长服务期限和使用寿命，提高其可靠性，降低轴承全寿命周期的开支。管棚钻机是在一般钻机的基础上发展起来的，尤其是近几十年得到了迅猛的发展。钻机具有的功能越来越多，钻进的效率越来越高，提高了劳动生产率，也节约了成本，保护了施工人员的生命安全。

第 1 章 动车组转向架轴承故障分析与可靠性模型的建立

1.1 动车组转向架轴承结构

转向架是动车组的走行机构，对于运行中的动车组，它具有导向、承载、减振、牵引和制动等功能，也是重点的检查部位之一，是保证动车安全运行的核心因素之一。图 2-1 是转向架结构示意，可见轴承通过轴箱与转向架相连，轴箱的轴承支撑着车辆静负荷和车辆运行中的纵向与横向冲击等动负荷，因此轴承要有较大的承重负荷能力与冲击负荷能力；必须有较高的寿命；制约的尺寸和重量；容易保养与检修以及具有很高的安全性和可靠性。

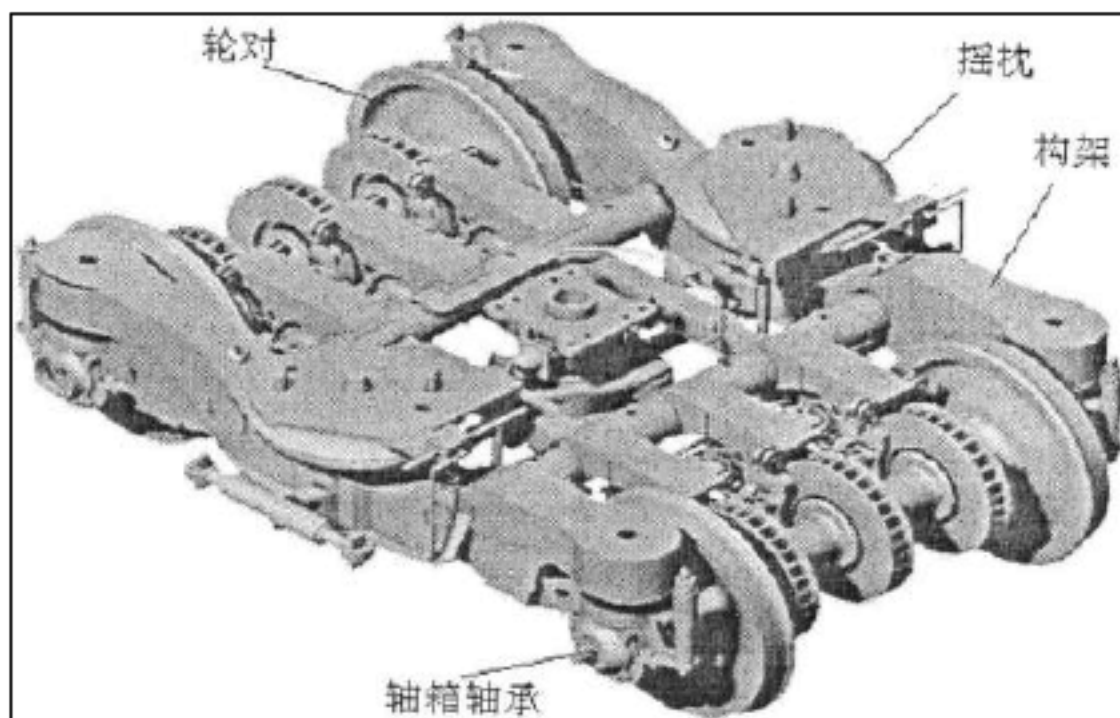


图 2-1 转向架简图

动车组转向架轴承一般由外圈、内圈、滚动体和保持架四部分组成。见图 2-2，内圈的作用是与轴相配合并与轴一起旋转；外圈作用是与轴承座相配合，起支撑作用。多数情况下是内圈随轴旋转，外圈不动。滚动体是滚动轴承中的核心原件，他是借助于保持架均匀的将滚动体分布在内圈和外圈之间，其形状大小和数量直接影响着滚动轴承的使用性能和寿命，它使相对运动表面间的滑动摩擦变为滚动摩擦，其形状也分为很多种，但我国动车组转向架轴承的滚动体为圆柱形和圆锥形。在球轴承内、外圈上都有凹槽滚道，它起着降低接触应力和限制滚动体轴向移动的作用。保持架使滚动体均匀分布并引导滚动体旋转起润滑作用，转向架轴承目前都为进口轴箱轴承，大部分为瑞典 **SKF** 德国 **FAG** 日本 **NTN**等国际巨头企业生产，一般为圆柱滚子轴承与圆锥滚子轴承。我国现在无法生产配套高铁轴承，但我国轴承行业正在大力研究，进行核心技术攻关，实现国产替代的过程势必不会漫长。

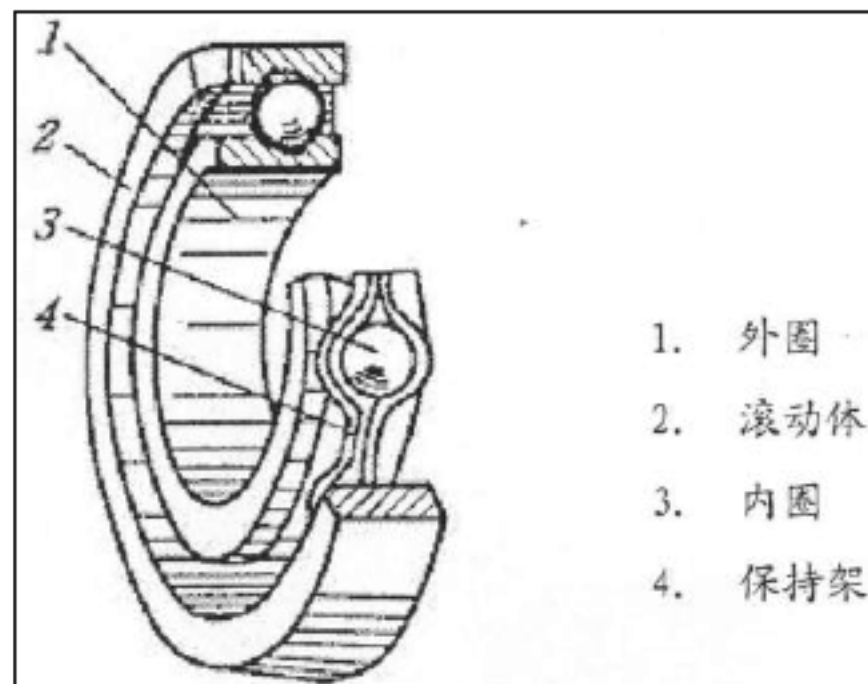


图 2-2 动车组转向架轴承示意图

1.2 动车组转向架轴承可靠性研究概述

动车组转向架轴承的可靠性研究分为失效分析和寿命预测两大部分。国内外在滚动轴承的失效分析方面积累了丰富的经验，所做的主要工作表现在如下几个方面。

(1) 轴承材料，不断的研究新的材料，提高其材料的冶金质量，以满足高速、重载和恶劣的等更苛刻的工作环境。

(2) 轴承的设计，不断改进和优化轴承的结构设计，如：增大滚子数目、直径、修正滚子凸度等。

(3) 轴承的制造和安装，制造包括热加工和冷加工。

(4) 轴承的工作条件。如：载荷的大小和性质，速度以及载荷及其分配的研究。

(5) 轴承的润滑与密封。表现在不断更换润滑形式和改进密封结构。

(6) 与轴承有关的装配体的维修。如：轴箱，轴承座等。

动车组转向架轴承的寿命的预测，是以一般轴承的寿命预测公式为基础的。目前国际上公认的寿命公式主要有 ISO 方法和 Timken 方法。它们都具有几个显著的特点。

(1) 把接触疲劳寿命作为轴承寿命。

(3) 认为轴承的寿命、套圈的寿命都服从威布尔分布。认为疲劳裂纹产生于滚动表面下最大剪切应力处，扩展到表面，产生疲劳脱落。考虑了材料冶炼的质量对寿命的影响。应力循环次数越多、受力体积越大，则材料的疲劳破坏概率就越大。

(4) 对于多列轴承, 认为载荷均匀分配。当然还有其他的寿命计算方法, 如: 考虑安装误差、表面粗糙度、切向摩擦牵引力、滚动离心力和润滑介质等因素的计算方法, 但应用不是很广泛。随着对滚动轴承疲劳机理的认识不断的深入, Chiu Y. P 和 Tallian T. A 提出了接触疲劳的工程项目。认为疲劳裂纹既可以从表面下, 也可以从表面上发生, 并建立了基本的计算方法。该理论能较好的分析 i 润滑和表面状况的影响, 但计算中有的常数难以确定, 不便应用。另一模型是接触疲劳的统计断裂模型。该模型将断裂力学概念用于接触疲劳是重要的发展方向, 20 世纪 80 年代, 瑞典 SKF 轴承公司的研究人员提出通用的轴承寿命计算模型, 其引入了局部应力和材料疲劳极限的概念。科学准确的预测轴承疲劳寿命一直是机械行业关注的难题, 其任重道远。

1.3 动车组转向架轴承的故障树分析

动车组转向架轴承长期在恶劣的工作环境中工作, 失效机理复杂, 影响轴承可靠性的因素很多。因此对动车组转向架轴承进行故障树分析是有着重要的意义。本文利用现场检修统计资料, 采用故障树分析法分析了动车组转向架滚动轴承的故障, 找出了发生故障的主要原因和产品在设计、工艺、选材等方面薄弱环节, 采取针对性改进措施并落实到生产实践中, 进一步提高产品可靠性水平。

1.3.1 故障树原理介绍

故障树分析技术(Fault Tree Analysis, FTA)是美国贝尔电报公司的电话实验室于 1962 年开发的, 它是一种将系统故障形成的原因由总体至部分按树状逐级细化的图形演绎方法, 通过对可能造成系统故障的各种可能因素或者因素组合进行分析, 画出故障树, 判明故障原因、确定故障发生的概率, 评价引发故障的各种因素的相关重要度。故障树分析技术具有直观、明了, 思路清晰, 逻辑性强等优点, 可以做定性分析和定量分析, 还可以指导故障诊断, 改进运行与维修体制。在故障树分析技术中通常把要分析的事件称为顶事件, 它是故障树分析的主题。将要分析的事件逐级分解深究的事件称为中间事件, 不能分解或不再深究的只考虑内事件称为基本事件, 这些事件有相应的符号代表, 事件符号见表 2-1; 顶事件、中间事件和基本事件通过适当的逻辑门组合起来成为树形图, 也就是故

障树，逻辑门符号见表 2-2。故障树表示了系统不希望发生事件与各子系统部件的故障事件之间的逻辑结构关系。故障树的建造是 FTA法的关键，故障树建造的完善程度将直接影响其定性分析和定量分析计算的准确性。故障树分析法是以故障树为工具，分析系统发生故障的各种原因、途径，提出有效防止措施的可靠性研究方法。

表 2-1 FTA 的事件符号	
符号	说明
	顶上事件、中间事件符号，需要进一步往下分析的事件。
	基本事件符号，不能再往下分析的事件。
	正常事件符号，正常情况下存在的事件。
	省略事件，不能或不需要向下分析的事件。

表 2-2 FTA 的逻辑门符号	
符号	说明
	或门，表示任一输入事件单独发生时，输出事件发生。
	与门，表示两输入事件同时发生时，输出事件才发生。
	异或门，表示输入事件单独发生时，输出事件才发生。
	顺序与门，表示输入事件按一定的顺序发生时，输出事件才发生。
	非门，表示满足条件时输入事件发生，输出事件才发生。

1.3.2 “系统”的定义

动车组转向架轴承失效的原因常划分为四大类:机械性的失效，润滑损坏，环境应力的损坏，冶金缺陷损坏。事实上，随着材料、冶金和生产技术的提高，由于冶金缺陷造成的轴承失效原因罕见。环境因素对轴承失效的影响，较常见的是通过导致机械性能变化和改变润滑状况起作用的。进一步说很难将一些环境因素与影响机械性能失效，润滑失效的因素完全独立开来，因为它们是一些半

相关的事件。关于动车组转向架轴承的失效分析的研究和现场实际情况都表明润滑是影响轴承寿命的主要因素之一。为了能够比较好的完成失效分析，把轴承的各个元件与润滑系统组合在一起，将轴承看作一个与外界并非完全独立的系统来讨论。该系统是由轴承内圈、外圈、滚动体、保持架、润滑系统以及其他组成。

1.4 动车组转向架轴承可靠性模型与故障树

轴承的失效标准可定义为:如果轴承内圈、外圈、保持架或任一滚动体出现疲劳破坏或破裂，就认为轴承失效。其可归类于串联系统，其可靠性串联模型如图 2-3，单元的可靠度决定系统的可靠度，单元之间相互独立，任一单元失效系统就会失效，因此提高其可靠度的有效方法是:改善系统的薄弱环节，提高它的可靠度。

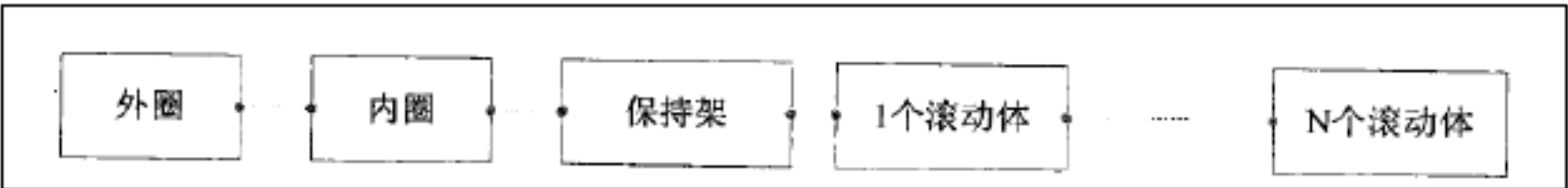


图 2-3 串联可靠性模型

动车组已经过了四级检修，在检修过程中发现动车组转向架轴承存在诸多的失效形式，我们对其常见失效的原因进行了研究。

先将轴承失效作为故障树的顶事件，内圈故障、外圈故障、滚子故障和保持架故障为中间事件，初步建立故障树见图 2-4，图中①代表锈蚀、②代表变色、③代表表面塑性变形、④代表麻点和疲劳剥落、⑤代表腐蚀、⑥代表裂纹和缺损等。

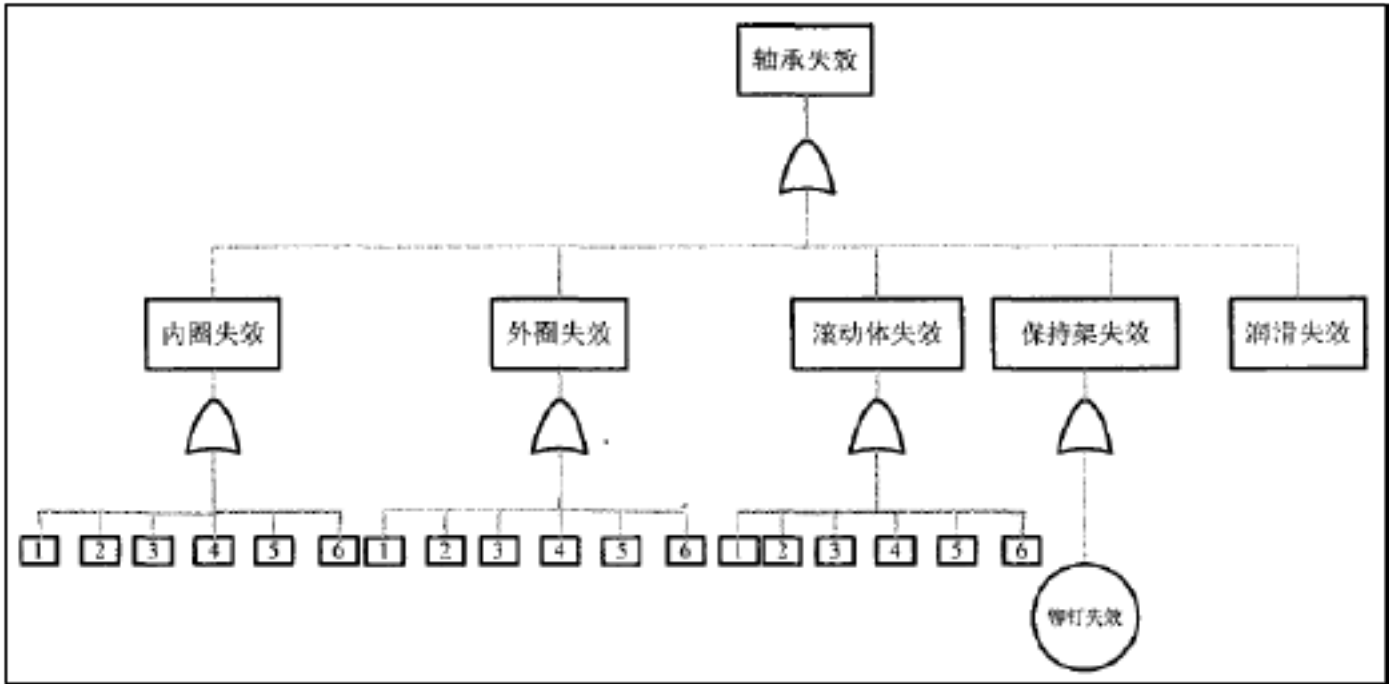


图 2-4 轴承失效的部分故障树

动车组转向架轴承失效形式、其原因以及故障树的建立:

(1) 锈蚀失效

锈蚀是由于轴承使用温度变化产生的冷凝水、润滑剂中添加剂的腐蚀性特质等原因形成的。轴承的生锈和腐蚀会造成套圈、滚动体表面的坑状锈，梨皮状锈及滚动体间隔相同的坑状锈，全面生锈及腐蚀。产生原因：密封装置不良，水分、腐蚀性物质(酸等)混入润滑剂中或轴箱内；润滑脂变质；其他偶然因素。

锈蚀失效的故障树如图 2-5 所示：

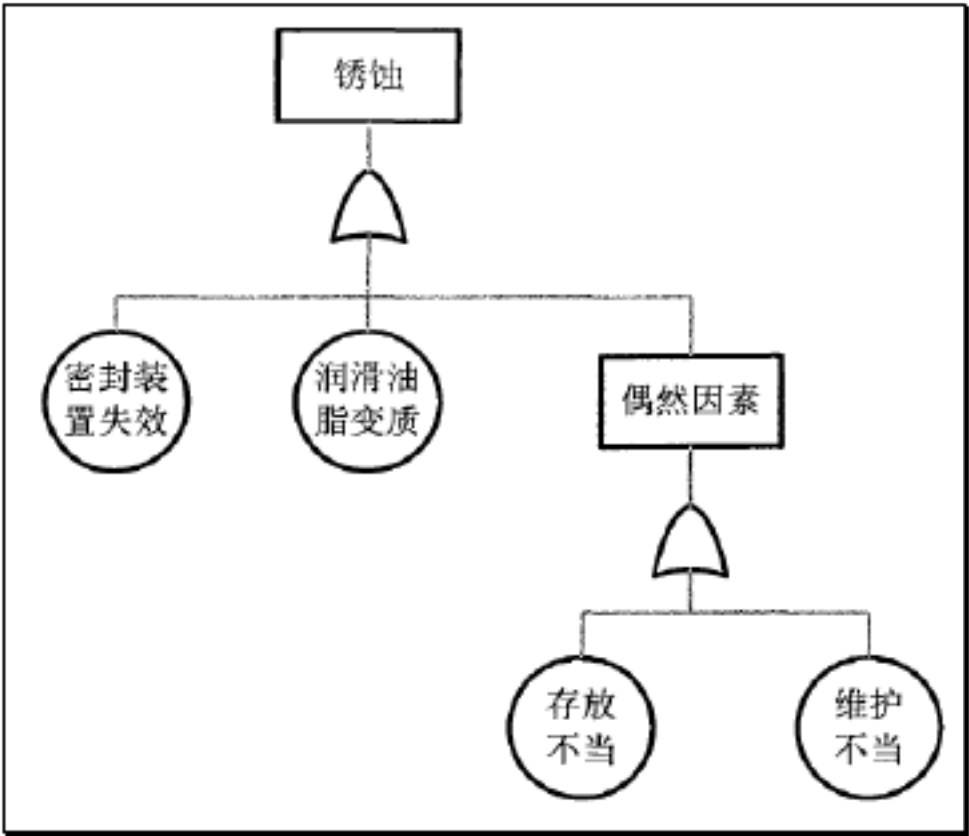


图 2-5 “锈蚀”故障树

(2) 变色失效

变色是由于轴承在运转过程中因发热引起的表面颜色变化。如果轴承表面颜色呈淡黄色、黄色、茶色、棕红色等说明变色没有深度，轴承可继续使用；但若轴承出现表面颜色为紫蓝色或蓝黑色时说明变色严重，轴承有了一定程度的损坏不能再继续使用。变色的主要原因是轴承的工作游隙过小；预载荷过大；润滑不良、润滑剂变质或使用过量；密封装置、垫圈、衬套等之间发生摩擦或配合松动而引起摩擦。

变色失效的故障树如图 2-6 所示：

(3) 表面塑性变形失效

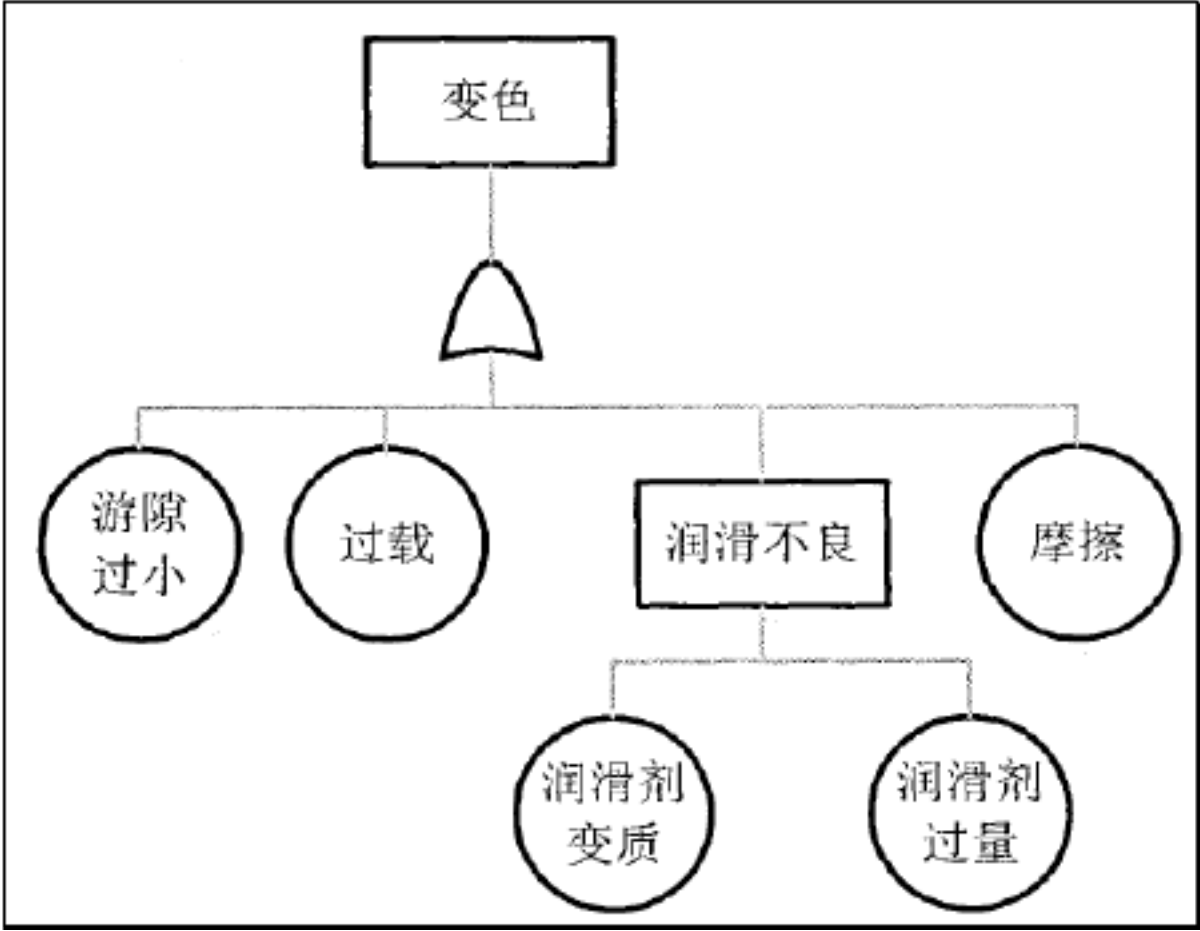


图 “变色”故障树

表面塑性变形主要是指轴承表面由于受到过大或额外载荷的作用形成的机械损伤。一旦轴承发生原有缺陷时，如擦伤、划伤、压坑(痕)、磕碰伤等，冲击载荷会使这些缺陷附近表面发生塑形变形。产生塑形变形的原因是：异物通过了密封不良的装置(或密封圈)进入了轴承内部；零件硬度低造成接触面上的材料颗粒脱离；润滑剂变质等。

表面塑性的故障树图 2-7 所示：

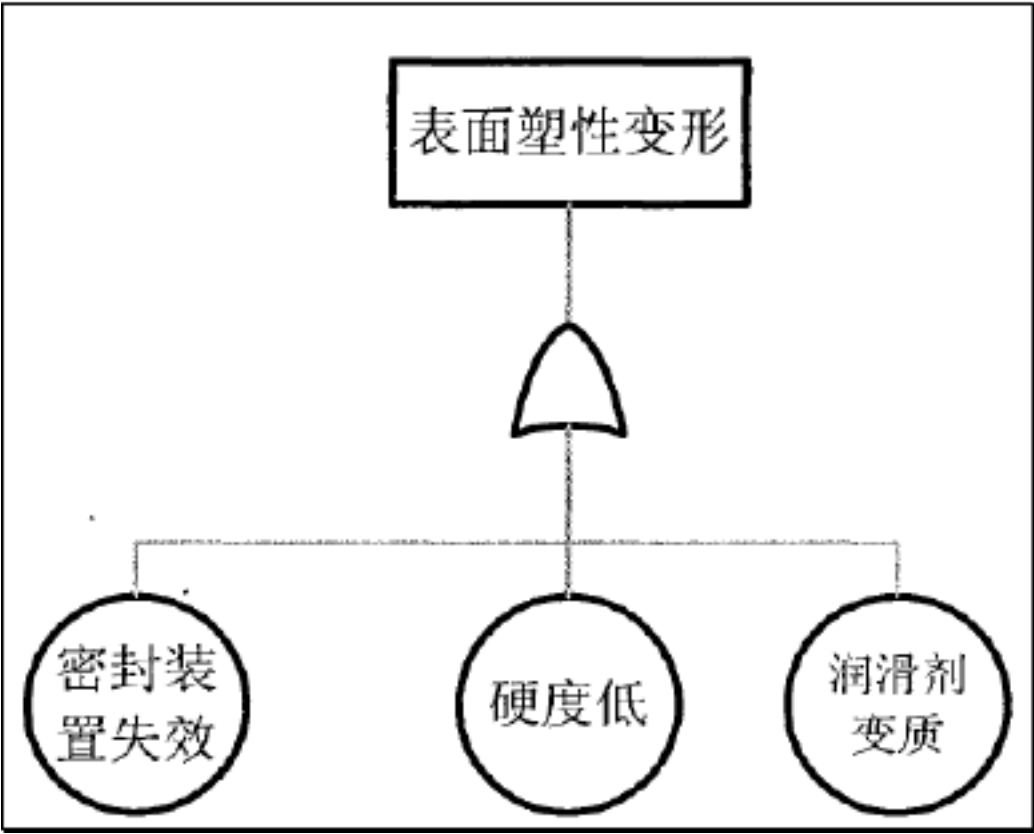


图 2-7 “表面塑性变形”故障树

(4) 疲劳剥落、麻点失效

轴承由于疲劳应力作用产生麻点、剥落. 如果在轴承长时间运转后发生，属

自然损坏。但如果在轴承的使用中期甚至前期发生,则应视为非自然损坏. 疲劳有许多类型,对于动车转向架轴承来说一般属于接触疲劳。滚动轴承套圈各滚动体表面,由于接触应力的反复作用,其滚动表面金属从金属基体呈坑状或片状剥落下来,这种现象就是疲劳剥落。产生疲劳剥落的原因复杂,目前比较统一的观点是:轴向载荷过大;装配不当, 内外圈安装歪斜;润滑不良;轴承间隙过小;轴承内圈与轴或轴孔与外圈配合面之间落入硬质杂质。

疲劳剥落、麻点失效的故障树如图 2-8 所示:

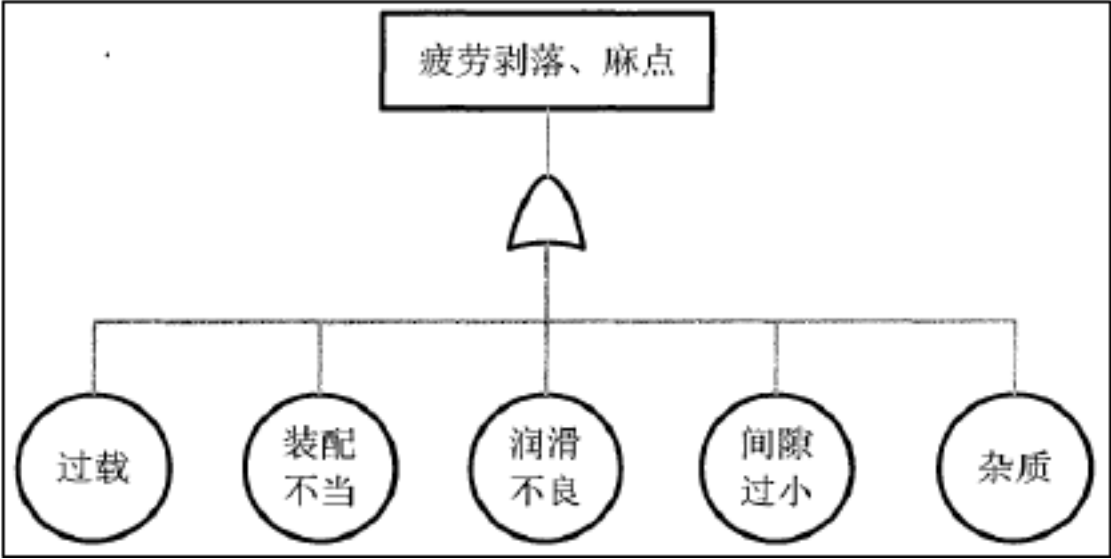


图 “疲劳剥落、麻点” 故障树

(5) 腐蚀是指金属材料与其所处环境中的介质发生化学或电化学反应变化所引起的消耗。腐蚀会显著降低金属的强度、塑形、韧性等力学性能，破坏金属构建的几何形状，增加零件间的磨损。就动车组转向架轴承而言，产生腐蚀的主要原因有:轴承内部或润滑剂中含有水、碱、酸等腐蚀物质;密封装置失效;装配不当，产生微振。腐蚀失效的故障树如图 2-9 所示:腐蚀失效。

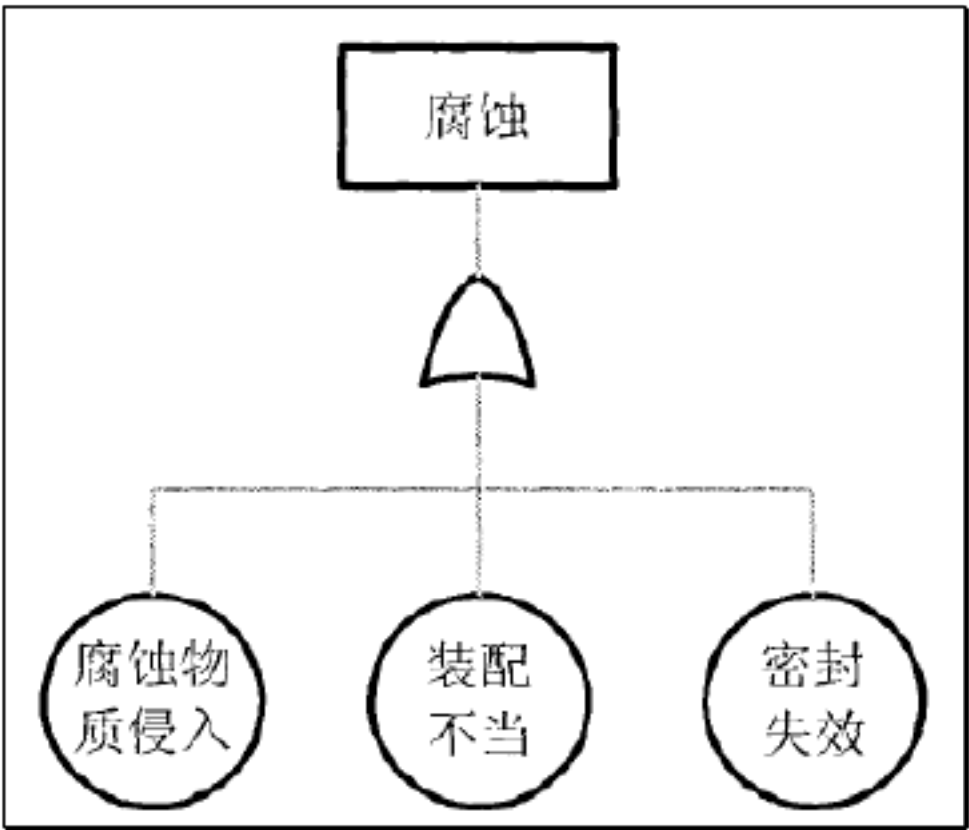


图 2-9 “腐蚀” 故障树

(6) 裂纹和缺损失效

当轴承零件所承受的外加载荷超出材料强度极限时，其内部或表面便发生断裂和局部断裂，这种使材料出现不连续或断裂的现象称为裂纹。缺损是指因为材料表面或表层下的细微裂纹扩展到一定程度使部分材料脱离零件的现象。对于动车组转向架轴承来说，它们产生的主要原因是；冲击载荷过大；装配不当，胶合发展；异物落入；润滑不良。

裂纹和缺损失效的故障树如图 2-10 所示：

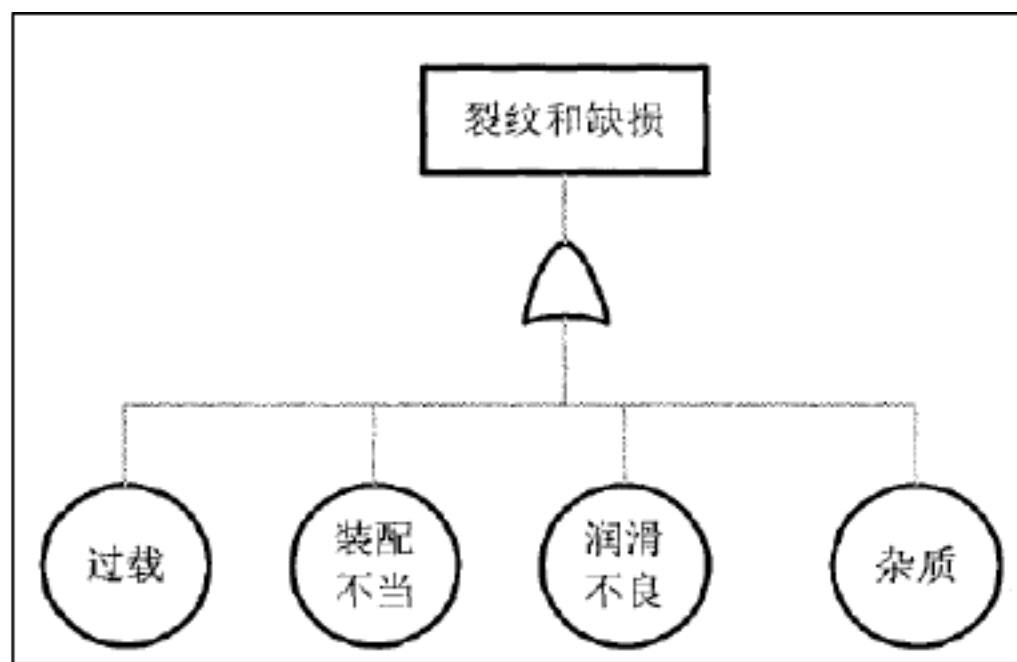


图 “裂纹和缺损”故障树

(7) 润滑系统失效

在前面的分析中，凡是与润滑不良有关的失效都与润滑系统有关，只是相关程度轻重不同。前面 6 种失效形式都假设了润滑系统是正常的，下面分析润滑系统的失效。

对于脂润滑，润滑系统指润滑剂、密封元件。对于油气润滑，润滑系统的组成部分定义为包刮：润滑油、润滑油的储存设备，输送油路以及送油动力设备，密封元件等。润滑是相当重要的因素。良好的润滑可以改善轴承接触的状况，减少摩擦发热，抑制轴承内部温度的升高。

润滑系统失效的故障树如图 2-11 所示：

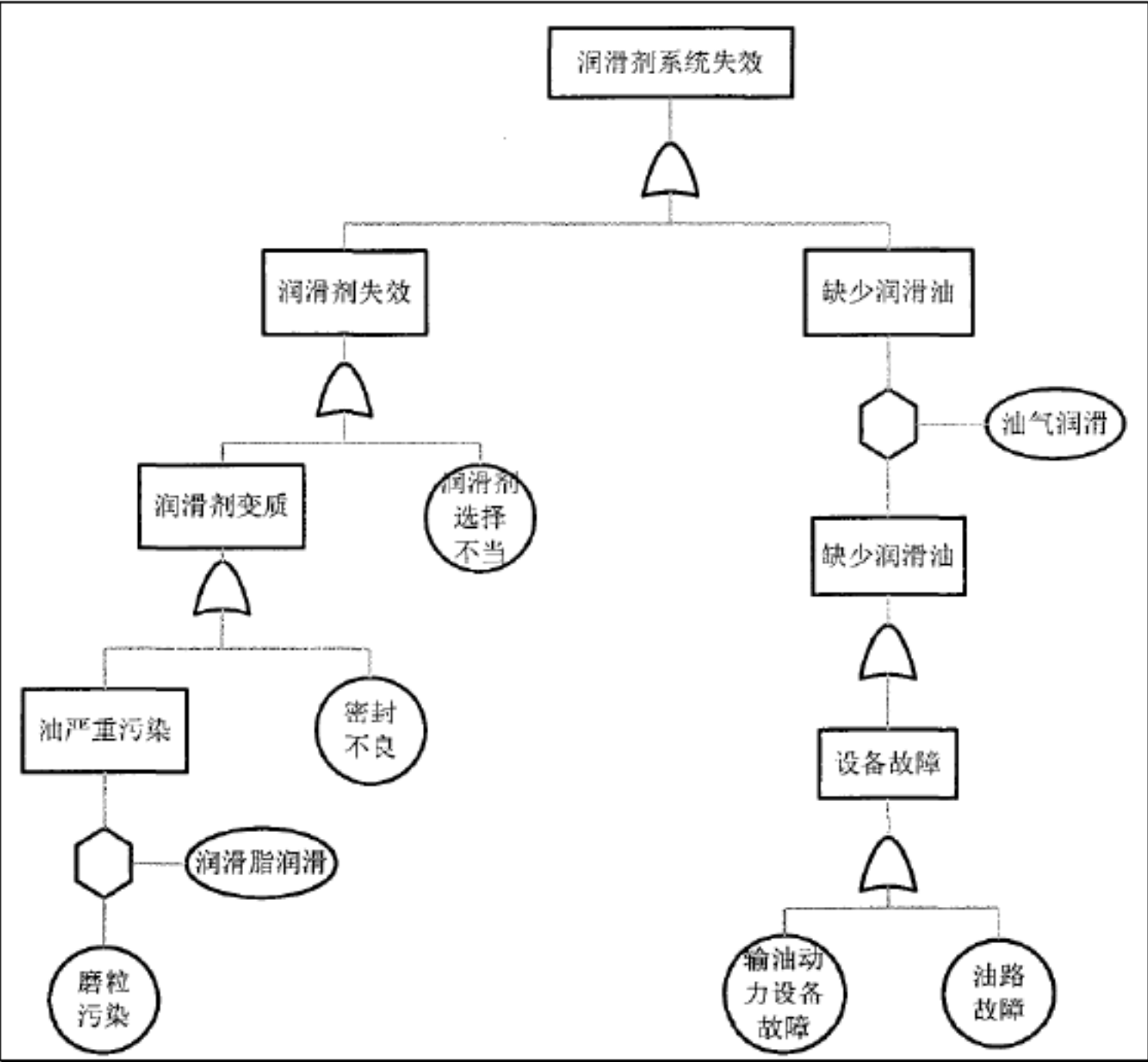


图 “润滑系统失效”故障树

把每个分系统的失效图组合起来就是轴承整个系统失效的故障树,由于该故障树中只有或门,故故障树中的每个基本事件对应一个最小割集。提高轴承的可靠性

1.5 可靠性提高的措施

上节综合考虑了各种失效模式及失效原因,建立了动车组转向架轴承失效的故障树。失效分析涉及到轴承本身的设计、制造、安装、润滑系统、密封、使用与维修等内容。在此分析的基础上,可以提出为提高轴承可靠性而采取的一些措施:

- (1) 加强和提高轴承润滑技术, 轴承密封装置的维修, 保证轴承受到良好润滑。
- (2) 在轴承维修方面, 制定现场适用的检修、清洗周期, 提高维修轴承的业务水平, 改善维修条件, 保证轴承维修的质量。
- (3) 在轴承设计方面, 改进轴承的结构, 以达到提高轴承抗冲击能力, 改善

轴承内部受力状况为目的。

(4) 改进轴承座的设计，增加轴承座的刚性，从而减少轴承四列的偏载程度。

2 章 动车组转向架轴承的检测技术与故障机理

2.1 动车组转向架轴承故障诊断的基本内容

动车组转向架轴承故障诊断与监测是通过轴承的劣化损伤以及性能状态参数，来判断和预测其可靠性和使用性，对异常情况的部位、原因和危险程度进行识别和诊断，及时的可靠的反映故障，防止事故的发生，保证整个动车组运行正常。总的来说，动车组转向架故障诊断的内容是：状态的监测，故障诊断和正确指导轴承的管理与维修三部分。

1. 状态监测

状态监测就是要采用各种方法掌握设备的运行状态，如检测、测量、分析和判别等。还需要结合系统的现状以及经验，考虑环境和突发因素，准确判断轴承状态，当其出现异常时，发出警报，提醒相关人员采取及时的措施。系统要具有显示和记录其状态的功能，为设备的故障分析和可靠性分析提供信息和基础数据。

2. 故障诊断

故障诊断技术的实质是：根据状态监测所获得的信息与数据，结合滚动轴承的运行历史、结构特性和参数条件，对滚动轴承的各种不同类型的故障进行预报和分析，并确定其性质、类型、原因、部位、严重程度、性能趋势和后果。

3. 指导轴承的管理维修

根据诊断结果，决定设备的维修方式和维修周期。避免“过剩维修”，防止因不必要的拆卸使设备精度降低，延长设备寿命；减少维修时间，提高生产效率和经济效益；减少和避免重大事故发生，故不仅能获得巨大经济效益，而且能获得很好的社会效益。

2.2 动车组转向架轴承故障监测常用技术

机械故障诊断技术发展几十年来，产生了巨大的经济效益，成为各国研究的热点。从诊断技术的各分支技术来看，美国占领先地位。美国的一些公司，如 Bently,HP 等，他们的监测产品基本上代表了当今诊断技术的最高水平。发展至今，动车组转向架轴承故障监测的常用技术主要有：振动诊断技术，温度诊断技术，油样分析技术，油膜电阻诊断技术，声发射诊断技术等。下面简要介绍这些

方。

1. 振动诊断技术

振动诊断技术是应用最早的、使用范围最广的故障监测诊断技术。运行的机械设备产生振动的原因是：表面的接触摩擦和旋转部件的不平衡等。进一步的研究表明：振动的强弱及其包含的主要频率成份和故障类型、部位和原因等有着密切的联系。本论文就是采用振动诊断技术，是通过安装在轴承座和箱体上的压电式传感器采集轴承的振动信号，并采用有效的方法对其进行分析和处理。振动分析法具有：对各种类型、工况的轴承适用；对早期轻微故障诊断有效；信号采集方便、分析简单、直观；诊断结果可信度高，在实际中得到了极为广泛的应用。在实际诊断中，传感器采集振动信号中不仅反映轴承本身的工作情况，还包含了动车组中其他运动部件和结构的干扰噪声。在动车运行中，有轻微的、局部故障的滚动轴承的振动信号成分往往会被干扰信号淹没，很难被分离与识别，对轴承的工况和故障的诊断会有一定的影响。因此，轴承振动诊断技术的关键是采用先进合理的振动诊断分析处理技术来抑制干扰信号，提取故障特征信息，有效地及时地发现轴承故障。

2. 温度监测技术

温度监测是通过测量运行中滚动轴承的温度来监测其工作状态是否正常的方法。温度监测法是一种常规、操作简单的故障诊断技术，轴承的温度对轴承的磨损程度和烧伤较为敏感，其应用在一定程度上能较好的反映轴承运行故障，提高了故障检测效率和增加了行车可靠性。但这种方法的缺点是：只有当轴承故障累积到相当严重的程度后，也就是轴承故障的晚期症状，温度才有明显的变化。而轴承出现早期故障如点蚀、剥落和轻微磨损时，温度监测无法发现。由于摩擦产生的热量与相对速度的平方成正比，车辆速度与切轴时间成反比，因此，温度监测逐渐成为滚动轴承的辅助监测技术，降低风险。

3. 油样分析技术

磨损、断裂、腐蚀和润滑不当是动车组转向架轴承失效的方式，其中润滑不当占主要部分。由于轴承在运行过程中是用油润滑或油冷却，零部件磨损等原因产生微小颗粒必然会带入到循环油液中。对轴承所使用的润滑油进行常规理化分析，或对其中的金属颗粒进行铁谱分析、颗粒计数等分析以及根据其形状和尺寸

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/987104126105006164>