



机械设备故障诊断实用技术丛书

齿轮故障诊断 实用技术

杨国安 编著

中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

内 容 提 要

本书是《机械设备故障诊断实用技术丛书》之第8分册。本分册共分四部分：第一部分是第一章和第二章，简要介绍了齿轮的发展、齿轮传动等，并详细介绍了渐开线齿轮、齿轮失效的形式及原因；第二部分是第三章和第四章，详细说明了齿轮的振动与噪声产生的原因、机理、特征等，并重点说明了齿轮振动信号的调制；第三部分是第五章和第六章，主要说明了齿轮故障诊断方法，包括振动信号和油样分析，还详尽介绍了齿轮的点检与修复，其中点检方法包括五官点检法和定量点检法；第四部分是第七章，总结了大量齿轮故障诊断案例。本书精选了大量典型实例用以说明故障诊断的思路。

本书内容详尽，通俗易懂，以解决实际问题为根本，主要作为现场从事机械设备管理与维护的工程技术人员使用，同时本书也为高等院校相关专业研究生或本科生在深入理解机械设备故障诊断理论体系方面提供了详尽的参考资料。

图书在版编目 (CIP) 数据

齿轮故障诊断实用技术 / 杨国安编著. —北京: 中国石化出版社, 2012. 1
(机械设备故障诊断实用技术丛书; 8)
ISBN 978 - 7 - 5114 - 1339 - 0

I. ①齿… II. ①杨… III. ①齿轮 - 故障诊断
IV. ①TH132. 41

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 276745 号

未经本社书面授权，本书任何部分不得被复制、抄袭，或者以任何形式或任何方式传播。版权所有，侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010)84271850

读者服务部电话:(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail:press@sinopec.com

北京科信印刷有限公司印刷

全国各地新华书店经销

*

787 × 1092 毫米 16 开本 10.25 印张 208 千字

2012 年 1 月第 1 版 2012 年 1 月第 1 次印刷

定价: 30.00 元

序

现代化工业生产越来越大型化、高速化、自动化，特别是石化、冶金、电力等过程工业，设备投资大，连续生产流程长，机械装备故障停机可以造成重大经济损失，甚至导致机毁人亡的重大事故。现代生产和某些特种装备对人的依赖程度越来越低，对设备的依赖程度越来越高，对故障的预示和诊治越来越重要。设备状态监测和故障诊断作为一门工程技术，是 20 世纪 60 年代以后才发展起来的。

近二三十年来国内设备诊断技术的研究开发异常活跃，发展迅速，在工厂应用经常取得出人意外的实效，设备诊断技术在工厂企业得到了普及和应用。为此，迫切需要提供一批适合不同层次科技人员特别是企业一线技术人员实用的书，同时也需要一些适合本科生和研究生学习用的参考书。杨国安教授编著的《机械设备故障诊断实用技术丛书》就是应这一需求编写的。

对设备的状态监测和故障诊断，实际上从机器诞生之日就已产生。当时人们通过听、摸、看、闻机器的振动、温度、噪声等异常情况，凭借工匠的经验，可以判断机器某些故障并采取对策或者修复。设备状态监测和故障诊断作为一门工程技术正在成为信息、监控、通信、计算机和人工智能等集成技术，并逐步发展成为一个多学科交叉的新学科。我曾在工厂工作 32 年，1979 年开始研究应用设备故障诊断技术。我很赞赏本丛书的出版，因为它既有基础理论知识，又有工程应用技术，对企业工程技术人员是一套难得的实用技术丛书；对缺少工程实践经验的院校研究生也是很好的参考书。

设备状态监测及诊断技术，是将运行中的机器看成“活”的，它时时刻刻在“说话”——发出信息，对其中的故障征兆信息进行采集、处理、分析，对故障进行早期诊断、预测，在机器没损坏之前查明故障原因并适时采取修复、预防和改进对策。故障诊断工作的决定作用在人，好的仪器有了真正掌

握了故障诊断技术的人才能够发挥作用。本丛书较全面地介绍了机械设备故障诊断技术的基础知识，包括设备故障诊断中的机械振动基础及信号处理，将理论与实践紧密结合，由浅入深，是一套很好的基础理论培训教材，也可供自学之用。本丛书还介绍了机电设备故障诊断实用技术、转子动平衡实用技术、轴承和齿轮故障诊断实用技术，并总结汇集了编者的若干科研成果，其内容实践性强，直观，便于掌握，可指导设备诊断工程实践。我对编者近几年不遗余力地编写这部内容丰富的丛书所付出的辛苦和做出的贡献表示钦佩。

机械装备故障诊断终极目标是有效防治故障，确保机器健康。其一是除故障：探测原因，有的放矢，消除故障；其二是防发展：早期预警，防微杜渐，预防故障；其三是防发生：查明根源，根治维修，防止故障。机械故障诊断是一门新兴的工程科学技术，它源于工程实践又应用于工程实践。企业技术人员作为机械故障诊断的“临床医生”会发现许多故障的征兆、积累丰富的诊断经验。希望读者对本书提出宝贵意见，使其不断修改完善。本人和作者同在一个科研团队，我们团队愿与读者一道，务实，求真，协力，创新，为提高我国设备诊断理论和技术水平作出应有的贡献。

深信丛书的出版能够在推广和普及机械故障诊断技术，培养更多的从事故障诊断的工程技术人才和后备力量方面发挥重要作用。是为序。

中国工程院院士

高金吉

编者的话

设备诊断技术是在设备管理和维修的基础上发展起来的。设备诊断技术就是掌握设备的现在状态与异常或故障之间的关系，以预测未来的技术。它包含两方面的内容：一是对设备的运行进行监测；二是在发现异常情况后对设备的故障进行分析和诊断。

设备诊断技术首先出现在欧洲，主要是以英国倡导的设备综合诊断学为指导，在上世纪60~70年代，英国机械保健和状态监测协会最先开始故障诊断技术，美国的发展则是以后勤学为指导的设备服务维修，美国在1961年开始执行阿波罗计划后，出现了一系列因故障造成的事故。1967年在美国航天局的倡导下，由美国海军研究室主持成立了美国机械故障预防小组，积极从事技术诊断的开发，他们在航空、航天、军事及核能等尖端领域处于领先地位。

日本则吸收了英美两国的优点，提出了全员维修(TPM)的观点。日本的新日铁自1971年开始开发诊断技术，1976年达到实用化。日本的钢铁、化工、电力等行业处于世界领先。

我国自1979年才初步接触开发诊断技术，1984年开始真正在企业推广故障诊断技术，并逐步形成了一支较有实力的故障诊断研究队伍，做出了许多卓有成效的研究成果，特别是自上世纪末，随着计算机技术的发展，彻底改变了故障诊断系统的软、硬件面貌，各种数据采集、分析、诊断功能的仪器被相继开发出来，各种专家系统也不断涌现，给工程技术人员提供了更有效的手段来分析解决问题。但问题也相继出现，现场工程技术人员由于受到专业知识的限制，面对琳琅满目的分析功能、界面、曲线，知其然不知其所以然；专家系统由于受到样本数量的影响，其可靠性、准确性也受到质疑。这使得故障诊断技术浮于研究层面，未有效地深入到基层，深入到生产第一线。应该讲故障诊断技术是一门实践性极强的应用科学，研究内容应本着“从实践中来，到实践中去”的原则，切实解决好生产一线存在的问题。

编者从上世纪90年代初开始接触大型装备预知维修技术，先后为几十家国有大型企业开展讲座和项目合作。通过这些项目的开展和与现场工作人员的广泛交流，使编者深深地认识到设备维护工作不仅直接关系到企业的生产效益和安全，而且与节能降耗和低碳环保也密切相关，甚至成为关键制约因素。当前故障诊断工作的推广应用最大的障碍是从事故障诊断技术的现场人员知识结构不合理和缺乏。他们懂得设备的结构、运行机制，却对时频变换不清楚，应该讲，故障诊断技术背后有严谨的数学知识作支撑。众多学科相互渗透构成了故障诊断技术的知识体系。有人说故障诊断就是传感器，有人说

是信号处理，有人说是数据挖掘、专家系统等等。这就充分说明了故障诊断技术知识结构的交叉性和多样性，编者近年来为很多企业培训故障诊断技术人员，和他们的亲密接触丰富了编者，也使编者感到编写一套适合于从事设备管理和维护工作的工程技术人员的实用技术丛书的必要性和迫切性。编者曾在2007年出版了《机械设备故障诊断实用技术》，该书的出版受到了企业设备管理维护人员的广泛欢迎，曾连续多次印刷。近几年通过与企业技术人员交流感到2007年出版的单行本内容上过于简捷，生产一线人员希望在内容体系、原理方法方面更细化些。鉴于此，编者决定出版一套系列丛书，以满足广大生产一线的设备管理和维修人员的需要。近几年，以一己之力编写这套丛书，虽殚精竭虑，仍力所不及，在这套丛书的编写过程中，现场技术人员和我的研究生提供了巨大的帮助。如果这套丛书对您有微薄之用，望不忘感念他们的辛勤付出。

本套丛书的目的是要较全面地对机械设备故障诊断技术的基础知识、机理、方法和应用技术进行较详尽地解释说明。尽量用一目了然的方式明确地说明关于故障诊断技术的一切。本书的宗旨是能用图形说明的尽量不去用文字解释，能用文字解释的不用数学去推演，即使用到的数学也尽量是初等的，从故障诊断基本概念出发，努力用最简单的数学来分析故障机理，而只有在确实需要时才使用复杂的方法。本书的内容参考了大量文献，包括网络上的一些优秀资源，综合汇编而成，这些内容为本书增添了许多新的知识。编者将在书后参考文献中尽量列出，争取不遗漏每一篇参考文献。但由于编者的疏忽可能存在遗漏现象，在此向遗漏参考文献的作者致以歉意，同时对这些优秀资源的作者和编者致以衷心的感谢！

这套丛书共分九分册，分别介绍了设备故障诊断中的机械振动基础、信号处理基础、旋转机械故障诊断实用技术、转子动平衡实用技术、往复机械故障诊断及管道减振实用技术、滚动轴承故障诊断实用技术、滑动轴承故障诊断实用技术、齿轮故障诊断实用技术和电动机故障诊断实用技术。在编写过程中，编者尽量照顾到整套丛书内容的系统性和完备性，尽力做到各分册间内容不重叠，但考虑到读者有选择地使用本套丛书的方便，有些内容各分册间是相通的，于是编者特意安排了适当的重叠，以加强每本分册的相对独立性，使每本分册也形成一个单独的知识体系，如第一分册和第二分册作为故障诊断技术的基础知识，各分册都会用到，但在每分册中也有相关知识的简介。

第一分册机械振动基础重点说明故障诊断中常用到的基本概念及基本原理的讲解和阐述，有针对性地介绍了与故障诊断技术相关的振动诊断标准。有些标准不同国家间可能略有差异，书中尽量同时列出，相同标准可能存在不同版本，考虑到目前现场的使用习惯，只要内容未变，也尽量照顾使用习惯列出，比如ISO2372，目前已有ISO10816，但考虑到使用习惯仍以ISO2372列出。

第二分册信号处理基础是本套丛书中的难点内容，重点说明信号处理的基础知识。本分册对数学基础有一定的要求，特别在傅里叶变换理论的阐述上，重点参考了国外的

经典教材和一些优秀的网络资源，对傅里叶变换的说明有独到之处，读者细读之必有所收获。该分册还较详尽地阐述了常用的故障诊断方法，这些知识对加深理解3~9分册的内容大有裨益。

第三分册旋转机械故障诊断实用技术重点说明旋转机械常见的故障诊断方法，该部分内容较成熟，也是故障诊断技术的重点内容之一。该分册还介绍了常用旋转机械和联轴器的点检方法和点检标准，这部分内容是企业实现预知维修和安全生产的重要保障。

第四分册转子动平衡技术主要说明轴及轴系动平衡原理，重点说明轴系现场动平衡技术，现场动平衡作为一门实用技术，广泛应用于多转子连接的轴系系统，简便易行，行之有效。书中以实例介绍了现场动平衡过程中的一些经验和方法。

第五分册往复机械故障诊断及管道减振技术主要说明往复压缩机的失效形式、故障诊断方法和常用点检方法。重点说明管道减振技术，阐述管道减振必须和往复机械整体考虑，标本兼治，才能做到本质安全，书中还以编者亲历的实例作了简要说明。往复机械故障诊断一直是世界性的难题，因此可参考的资料很少，且不系统。本书部分内容是编者结合自身多年来在往复机械及管道减振方面解决现场实际问题过程中所取得的一手资料和经验整理编辑而成。

第六分册滚动轴承故障诊断实用技术、第七分册滑动轴承故障诊断实用技术和第八分册齿轮故障诊断实用技术三分册均主要说明三种常用零件的失效形式，重点说明常用的故障诊断方法，简要说明各自的点检方法和标准，三分册分别介绍了基于油样分析的故障诊断技术。其中第六分册还介绍了滚动轴承的基础知识，以便读者查阅更方便。第七分册介绍了滑动轴承常用材料和液体润滑的基本原理，以便读者在分析滑动轴承故障时，能够与润滑理论相结合考虑，因为滑动轴承任何形式的故障无不与润滑油膜有关，至于气体润滑轴承只为增广读者知识面而考虑。第八分册介绍了齿廓啮合基本定律，以便读者在分析齿轮故障时，能充分考虑到齿轮齿廓形状，因为齿轮的大多数故障都与齿廓曲线被破坏有关，最常用的渐开线齿廓满足五线合一，不同的故障形式归结起来都是不同程度地破坏了五线合一原则。滚动轴承和滑动轴承作为独立的零件很难制定其零件的点检标准，且这样做也不存在任何意义，因为这两种零件的使用离不开机器本身，因此，所列点检标准为其所安装的相关机械设备的点检标准。

第九分册电动机故障诊断实用技术简要说明常用电动机的基本原理，以便读者分析故障时，能够结合电动机运行机制加以考虑。重点说明电动机振动故障诊断和电气故障诊断方法，简要介绍了电动机温度和噪声故障诊断方法。考虑到电机日常维护，本书还介绍了电动机的点检方法和日常修理和保养方法。

总之，故障诊断技术的终极目标是保证设备长周期、安全稳定运行，投入大量资金购买最现代化的仪器设备是必要的，但首要任务是充实现场工程技术人员的知识储备，包括理论和实际的经验。现在从事故障诊断的人员，通过望、闻、问、切能对设备的运

行状况作出评价的越来越少。当振动异常的时候，对于常见故障，能借助仪器得出诊断结论，能够对问题给出合理解释的人才越来越缺乏，故障诊断工作的决定作用在人，不在仪器。仪器仅仅是人的工具，如果人不行，再好的仪器也无用；好的仪器有了有准备的人才能够发挥作用。真正掌握了故障诊断技术，加上得力的仪器设备，才能使设备维护人员大有用武之地，而成为别人无法替代的人才！

近几年，编者有幸得到国家自然科学基金的支持，对科学基金的研究深化了编者对故障诊断技术的认识，如果说企业合作项目丰富了编者的实践知识，那么，国家自然科学基金项目则提升了编者的基础理论水平，使编者在更高的层面上更加理性地分析、判断每一种故障形式，所以，对近年来国家自然科学基金项目(50875016)的支持表示感谢。

本分册在资料查阅、收集、整理和编排上，我的研究生陈宗衍、沈江做了卓有成效的工作，这本书的出版与他们的辛勤付出密不可分。在此对陈宗衍、沈江同学表示谢意。

由于本套丛书的编写工作十分浩大，限于编者水平，恳切希望读者对本套丛书中出现的错误和不妥之处提出批评指正，编者将不胜感激。编者网址：www.ygazd.cn，E-mail：yangga@mail.buct.edu.cn 或 ygapublic@163.com。

谨以此书献给辛勤工作在生产第一线的机械设备管理维护人员和有志于故障诊断技术研究的科学技术人员！

编 者

2011年10月于北京化工大学

目 录

第一章 齿轮概述	(1)
第一节 齿轮的发展	(1)
第二节 齿轮传动	(1)
一、齿轮传动的特点	(2)
二、齿轮传动的类型	(2)
第三节 齿轮的齿廓曲线	(5)
一、齿廓啮合定律	(5)
二、齿廓曲线的选择	(6)
第四节 渐开线齿廓及啮合特点	(6)
一、渐开线齿廓基础	(6)
二、渐开线方程与函数	(7)
三、渐开线齿廓的特点	(7)
第五节 渐开线圆柱齿轮的基本参数与计算	(8)
第六节 渐开线直齿圆柱齿轮的啮合传动	(10)
一、渐开线齿轮的啮合过程	(10)
二、渐开线齿轮的啮合条件	(11)
第七节 渐开线齿轮连续传动的条件	(11)
第二章 齿轮失效的形式及原因	(13)
第一节 齿轮的主要失效形式	(13)
一、齿面耗损类型	(13)
二、胶合	(18)
三、永久变形	(19)
四、疲劳失效	(20)
五、裂缝和裂纹	(23)
六、轮齿折断	(24)
第二节 齿轮失效的原因	(28)
一、制造误差	(28)
二、装配误差	(28)
三、润滑不良	(29)
四、超载	(29)

五、操作失误	(29)
第三章 齿轮的振动与噪声	(30)
第一节 齿轮振动与噪声产生的原因	(30)
一、齿轮传动中节线的冲击	(30)
二、齿轮的啮合冲击	(30)
第二节 齿轮的振动机理分析	(31)
第三节 齿轮故障的振动信号特征	(32)
一、正常齿轮的振动信号特征	(32)
二、故障齿轮的振动信号特征	(32)
第四节 齿轮振动信号的其他成分	(37)
一、附加脉冲	(37)
二、隐含成分	(38)
第五节 影响齿轮振动的主要因素	(39)
一、齿轮的啮合振动	(39)
二、齿轮的固有频率振动	(40)
三、齿轮的制造和装配误差引起的振动	(40)
四、齿轮磨损引起的振动	(41)
五、轮齿断裂引起的振动	(41)
六、齿轮制造缺陷引起的振动	(41)
七、齿轮不同轴引起的振动	(42)
第六节 齿轮的噪声机理分析	(42)
第七节 影响齿轮噪声的主要因素	(43)
一、齿轮的类型	(44)
二、齿轮的模数	(44)
三、齿轮的齿数和直径	(45)
四、齿宽	(45)
五、啮合系数	(46)
六、齿距误差	(47)
七、齿形误差	(47)
第四章 齿轮振动信号的调制现象	(48)
第一节 幅值调制	(48)
第二节 频率调制	(50)
第三节 齿轮振动信号的调制	(51)
一、齿轮振动信号调制特点	(51)

二、齿轮固有频率调制现象	(52)
三、齿轮箱固有频率调制现象	(52)
四、激振能量对不同调制振动的影响	(53)
第五章 齿轮故障诊断方法	(55)
第一节 基于振动信号的齿轮故障诊断方法	(55)
一、时域分析	(55)
二、时域同步平均法	(57)
三、残差法	(60)
四、频谱分析	(60)
五、功率谱边频带分析	(62)
六、细化谱分析法	(63)
七、倒频谱分析法	(65)
八、频率解调分析法	(68)
九、低速测量技术	(71)
第二节 基于油样分析的齿轮故障诊断方法	(73)
一、光谱分析	(74)
二、铁谱分析法	(76)
三、磁塞分析	(82)
四、齿轮及齿轮箱故障油样分析实例	(83)
第六章 齿轮的点检与修复	(88)
第一节 点检基础知识	(88)
一、点检的含义	(88)
二、点检的目的	(88)
三、点检的分类	(88)
四、点检的主要环节	(89)
五、点检员所需的技能	(90)
第二节 齿轮、齿轮箱的点检	(90)
第三节 点检标准	(112)
第四节 推广点检工作应注意的问题	(120)
第五节 齿轮的修复	(121)
一、齿轮的修复原则	(122)
二、齿轮的修复方法	(123)
第七章 齿轮故障诊断实例	(127)
第一节 基于振动信号的齿轮故障诊断实例	(127)

第二节 基于油样分析的齿轮故障诊断实例	(133)
附录一 齿轮的振动诊断标准	(143)
附录二 齿轮故障诊断图谱表	(146)
参考文献	(148)

第一章 齿轮概述

第一节 齿轮的发展

机械传动具有恒功率输出、承受能力大、效率高、寿命长、可靠性高、结构紧凑等优点，广泛应用于各种机械设备和仪表中。齿轮传动是机械传动的主要形式。齿轮是机器的基础件，其质量、性能、寿命直接影响整机的技术经济指标。齿轮形状复杂，技术问题多，制造难度较大，因此齿轮的制造技术水平在很大程度上反映了一个国家机械工业的水平。

齿轮是轮缘上有齿，能连续啮合传递运动和动力的机械元件，早在 1694 年，法国学者 Philippe DeLa Hire 就提出渐开线可作为齿形曲线。1733 年，法国人 M. Camus 提出轮齿接触点的公法线必须通过中心连线上的节点。一条辅助瞬心线分别沿大轮和小轮的瞬心线（节圆）纯滚动时，与辅助瞬心线固联的辅助齿形在大轮和小轮上所包络形成的两齿廓曲线是彼此共轭的，这就是 Camus 定理。它考虑了两齿面的啮合状态，明确建立了现代关于接触点轨迹的概念。

19 世纪末，展成切齿法的原理及利用此原理切齿的专用机床与刀具的相继出现，使得加工齿轮具有比较完备的手段，于是渐开线齿形更显示出其巨大的优越性。切齿时只要将切齿工具从正常的啮合位置稍加移动，就能用标准刀具在机床上切出相应的变位齿轮。为了提高动力传动齿轮的使用寿命并减小其尺寸，除从材料、热处理及结构等方面改进外，还可以通过改变齿形曲线达到目的，这使得圆弧齿形的齿轮获得了发展。

齿轮主要作用是传递空间任意两轴（平行、相交、交错）的旋转运动，实现减速、增速、变向和换向等动作。我们常见的减速箱就是这一应用的代表。齿轮还可以将转动转换为移动，如齿轮齿条机构。

中国齿轮开始应用于汽车、机床、重型机械、电站设备、石油化工等机械制造业，随后机械制造业也开始发展起来。到 1963 年左右，我国已能成批生产齿轮，而且一般规格的齿轮机床与刀具、量仪也能由国内制造。后来，国家新建和改建了一大批齿轮与齿轮箱的专业厂与专业车间，进一步扩大了齿轮配套的生产能力，到 20 世纪 70 年代末，已基本上形成齿轮制造工业的完整体系。

第二节 齿轮传动

齿轮传动是利用两齿轮的轮齿相互啮合来传递空间任意两轴间的动力和运动的机械传动，是机械传动中最重要的传动之一，形式多样，应用广泛。

一、齿轮传动的特点

齿轮传动具有结构紧凑、效率高、寿命长等特点。其具体表现如下：

(1) 传动效率高

在常用的机械传动中，齿轮的传动效率最高。一般精度较高的圆柱齿轮副，其效率可达 98% ~ 99% 以上。

(2) 传动比准确

对于固定速比的齿轮传动，其瞬时传动比是恒定的，工作平稳性较高；对于可变速比齿轮传动，可采用各种差动式行星齿轮传动，对于要求实现特殊的运动或按特别的运动函数传动，可采用非圆齿轮传动。传动比稳定往往是对传动性能的基本要求。

(3) 结构紧凑

与其他机械传动形式如带、链条、摩擦、液压等传动比较，其传动结构较紧凑。在满足相同的条件下，齿轮传动所需的空间一般较小。

(4) 传动比变化范围大，适用于减速或增速传动

一般单级圆柱齿轮传动比为 1 ~ 8，普通行星齿轮传动比为 28 ~ 125，蜗轮蜗杆传动比为 5 ~ 100，少齿差传动比为 10 ~ 200，谐波齿轮传动比为 80 ~ 320。

(5) 传动功率范围大，承载能力高

高速齿轮传动功率可达 50000kW 以上，低速重载齿轮的转矩可达 $14 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{m}$ 以上。

(6) 使用寿命长

设计合理的齿轮，在适当材料与热处理工艺条件下，并具有足够的齿轮制造精度，保证在正常的工况下运转工作，可取得较长使用寿命，一般为 5 ~ 10 年以上，较好的情况可到 20 ~ 30 年。

但齿轮的制造及安装精度要求高，运转时有振动和噪声，会产生一定的动载荷，无过载保护，一些特殊齿廓的齿轮及专用齿轮的制造成本较高，且不宜用于传动距离较大的场合。

二、齿轮传动的类型

按齿轮轴线的相对位置可分为：平行轴圆柱齿轮传动、相交轴圆锥齿轮传动和交错轴螺旋齿轮传动。

1. 平行轴圆柱齿轮传动

圆柱齿轮传动用于平行轴间的传动，一般传动比单级可到 8，最大 20，两级可到 45，最大 60，三级可到 200，最大 300。单级效率为 0.96 ~ 0.99。圆柱齿轮又包括直齿轮、斜齿轮和人字形齿轮，分别如图 1-1 (a)、(b)、(c) 所示。

图 1-1 (a) 中轮齿的齿向与齿轮轴线的方向一致，称为直齿轮。直齿轮传动适用于中、低速传动。图 1-1 (b) 中轮齿的齿向与齿轮的轴线倾斜了一个角度，称为斜齿轮。斜齿轮传动运转平稳，适用于中、高速传动。图 1-1 (c) 中齿轮的某一部分齿宽

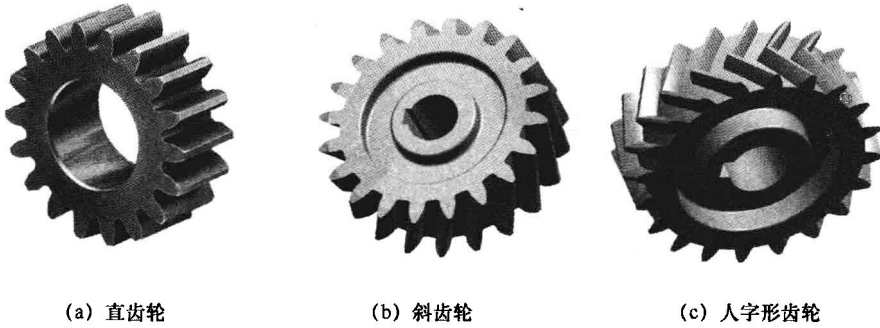


图 1-1 圆柱齿轮

上为右旋齿而另一部分齿宽为左旋齿，可视为由螺旋角方向相反的两个斜齿轮所组成。人字齿轮传动适用于传递大功率和大转矩的传动。圆柱齿轮传动的啮合形式有 3 种：外啮合齿轮传动，由两个外齿轮相啮合，两轮的转向相反，如图 1-2 (a) 所示；内啮合齿轮传动，由一个内齿轮和一个小的外齿轮相啮合，两轮的转向相同，如图 1-2 (b) 所示；齿轮齿条传动，可将齿轮的转动变为齿条的直线移动，或者相反，如图 1-2 (c) 所示。



图 1-2 齿轮传动的啮合形式

2. 相交轴圆锥齿轮传动

圆锥齿轮传动用于相交轴间的传动。它有直齿和斜齿之分。直齿应用最广，单级传动比可到 6，最大到 8，传动效率一般为 0.94 ~ 0.98，图 1-3 (a) 为直齿圆锥齿轮传动。斜齿锥齿轮传动运转平稳，齿轮承载能力较高，但制造较难，应用较少，图 1-3 (b) 为斜齿锥齿轮传动。斜齿锥齿轮由于其传动平稳，承载能力高，常用于高速重载的传动中，如汽车、拖拉机、飞机等的传动中。

3. 交错轴螺旋齿轮传动

交错轴螺旋齿轮传动用于交错轴间的传动。主要有双曲面齿轮传动、蜗杆传动和螺旋齿轮传动这三种。

双曲面齿轮传动单级传动比可到 10，最大到 100，传动效率一般为 0.9 ~ 0.98，由于有轴线偏置距，可以避免小齿轮悬臂安装，图 1-4 (a) 所示为交错轴双曲面齿轮传动。

蜗杆传动为交错轴传动的主要形式，轴线交错角一般为 90° 。蜗杆传动可获得很大

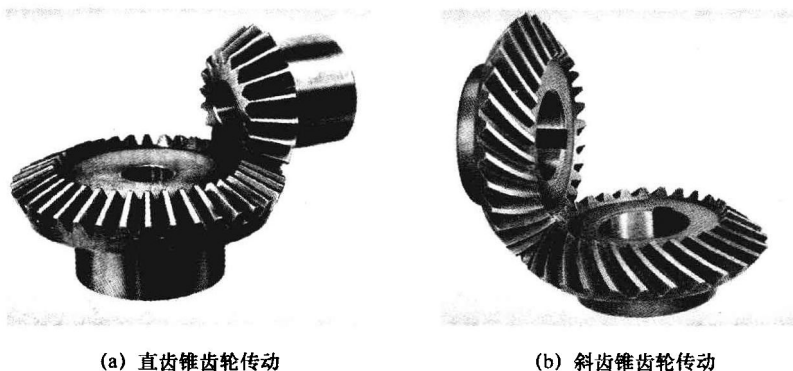


图 1-3 圆锥齿轮传动

的传动比，通常单级为 8~80，用于传递运动时可达 1500，蜗杆传动工作平稳，传动比准确，可以自锁，但自锁时传动效率低于 0.5。蜗杆传动齿面间滑动较大，发热量较多，传动效率低，通常为 0.45~0.97，如图 1-4 (b) 所示。

螺旋齿轮传动是由两个斜齿轮相啮合组成的，传动比可达到 5。在传动过程中由于沿齿向和齿宽方向都有相对滑动，故传动效率低，磨损快，常用于仪表和载荷不大的辅助传动中，如图 1-4 (c) 所示。

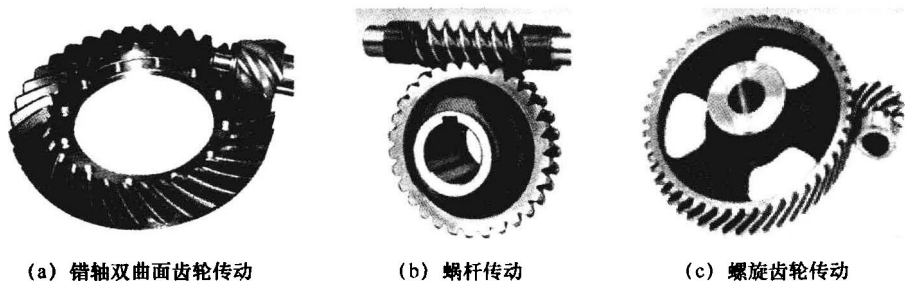


图 1-4 准双曲面齿轮

根据齿轮的工作条件，可分为以下类型：

1. 开式齿轮传动

如在农业机械、建筑机械以及简易的机械设备中，有一些齿轮传动没有防尘罩或机壳，齿轮完全暴露在外面，这叫开式齿轮传动。这种传动不仅外界杂物极易侵入，而且润滑不良，因此工作条件不好，轮齿也容易磨损，故只宜用于低速传动。

2. 半开式齿轮传动

当齿轮传动装有简单的防护罩，有时还把大齿轮部分浸入油池中，则称为半开式齿轮传动。它的工作条件虽有改善，但仍不能做到严密防止外界杂物侵入，润滑条件也不算最好。

3. 闭式齿轮传动

汽车、机床、航空发动机等所用的齿轮传动，都是装在经过精确加工而且封闭严密的箱体（机匣）内，这称为闭式齿轮传动（齿轮箱）。它与开式或半开式的相比，润滑

及防护等条件最好，多用于重要的场合。

齿轮传动在机械传动中占有重要地位，所以在对齿轮类型进行选择时，一般考虑以下原则：

- (1) 工作机械对传动装置的结构与动力参数的要求，如传动装置的尺寸、安装位置、功率（或转矩）、转速、效率等。
- (2) 工作机械对传动装置的性能要求，如传动精度、振动、噪声、负荷特性、与工作可靠性等。
- (3) 动力机械的安装位置、功率、转速与负荷特性情况。
- (4) 传动装置的合理性、先进性、经济性与通用性等。
- (5) 制造设备条件、生产工艺水平与所需生产批量。
- (6) 利用类比法选型的可能性，即参考已有或类似机械的使用情况与选型经验。

第三节 齿轮的齿廓曲线

齿轮机构是依靠主动轮的齿廓推动从动轮的齿廓来实现运动传递的。两轮的瞬时角速度之比称为传动比。齿轮传动最重要的要求之一，就是传动比必须恒为常数。否则当主动轮以等角速度回转时，从动轮的角速度将为变数，从而产生了惯性力，它不仅影响齿轮的寿命，使其过早地破坏，同时也引起机器的振动，发生噪音和影响工作精度。

一、齿廓啮合定律

对于齿轮整周传动而言，无论两齿轮的齿形如何，其平均传动比总等于齿数的反比，即

$$i_{12} = n_1/n_2 = z_2/z_1 \quad (1-1)$$

但齿轮传动的瞬时传动比却与齿轮的齿廓形状有关。

如图 1-5 所示，由瞬心概念可知，两啮合齿廓在接触点处的公切线 N_1N_2 与两齿轮连心线 O_1O_2 的交点 C 即为两齿轮的相对瞬心，故两轮此时的传动比为

$$i_{12} = \omega_1/\omega_2 = \overline{O_2C}/\overline{O_1C} \quad (1-2)$$

该式表明，相互啮合传动的一对齿轮，在任意位置时的传动比，都与其连心线 O_1O_2 被其啮合齿廓在接触点处的公法线所分成的两线段长成反比。这个规律称为齿廓啮合基本定律。根据这一定律可知， C 点为固定点，称为节点。由此得到两轮作定传动比传动时，其齿廓必须满足的条件：无论两齿廓在何处

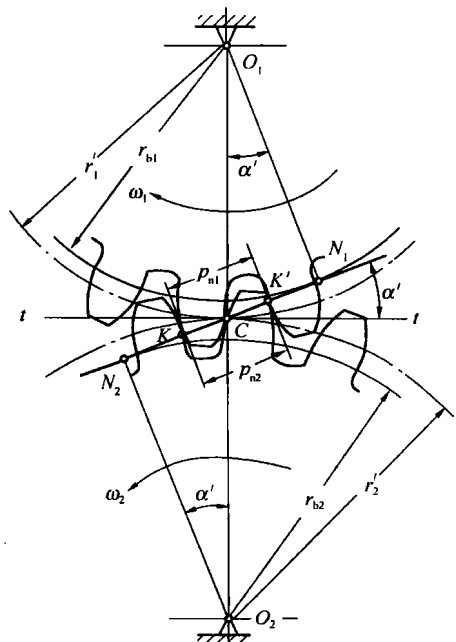


图 1-5 齿轮啮合示意图