

齿轮

精度与检测 技术手册

高延新 张晓琳 李慧鹏 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

齿轮精度与检测技术手册

高延新 张晓琳 李慧鹏 主编



机械工业出版社

本书主要介绍了各种齿轮传动的精度设计和检测方法。研究的具体对象是渐开线圆柱齿轮、小模数渐开线圆柱齿轮、锥齿轮、小模数锥齿轮、内齿轮、齿条传动、圆弧圆柱齿轮、圆柱蜗杆蜗轮、小模数圆柱蜗杆蜗轮、计时仪器用齿轮和齿轮测绘。

为使本书更具有实用性并方便读者查阅,本书给出了大量的表格、数据及应用实例。

本书可供从事机械设计、制造、检测的专业人员及科研人员使用,也可作为高等院校、职业技术学院相关专业师生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

齿轮精度与检测技术手册/高延新,张晓琳,李慧鹏主编. —北京:机械工业出版社,2014.5

ISBN 978-7-111-47379-4

I. ①齿… II. ①高…②张…③李… III. ①齿轮精度-检测-技术手册
IV. ①TH132.41-62

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第159978号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:曲彩云

责任编辑:曲彩云 版式设计:霍永明

责任校对:刘雅娜 丁丽丽 封面设计:陈沛 责任印制:李洋

北京宝昌彩色印刷有限公司印刷

2015年3月第1版第1次印刷

184mm×260mm·49.25印张·1345千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-47379-4

定价:139.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88361066

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-68326294

机工官博:weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网:www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网:www.cmpedu.com

前 言

齿轮是机械行业用得最为广泛的机械零件之一。近年来,随着我国机械工业的发展和进步,国家陆续颁布了一系列有关齿轮方面的新标准,国内许多高等学校、科研院所和相关企业研发了许多新型的齿轮量仪和检测技术。准确地解读这些齿轮新标准,推广应用这些新的测量技术,直接影响我国的齿轮制造业的发展和我国齿轮行业在国际市场中的竞争力。为此,在搜集了大量的资料和对齿轮生产骨干企业进行充分调研的基础上,编写了本书。

本书的特点是密切结合了我 国齿轮行业的生产实践,全面采用了我国的现行标准并参考了国际新标准。为方便读者使用,书中除了给出大量的数据和图表外,每一章节中也给出了应用实例。

本书由哈尔滨工业大学的高延新、张晓琳和北京航空航天大学李慧鹏任主编;由厦门大学的范贤光、哈尔滨工程大学的刘鸣和哈尔滨工业大学的高金良任副主编,由哈尔滨工业大学的唐文彦任主审。此外参加编写的人员还有:哈尔滨东安发动机(集团)有限公司的王德辉,哈尔滨工业大学的王军,中航油料公司的高金麟,北京农业职业学院的陈静等。具体编写分工如下:第2章由张晓琳编写;第4~6章由李慧鹏编写;第3章、第9章、第10章由范贤光编写;第8章由王德辉编写;第7章和第12章由王军编写,其余由高延新、刘鸣、高金良、高金麟编写。本书全部的英文译稿由陈静提供。

在本书的编写过程中,哈尔滨量具刃具有限公司的张伟、哈尔滨智达测控技术有限公司的张兰和经挺度、哈尔滨精达测量仪器有限公司的孙岩、西安共达精密机器有限公司的王建华、西安爱德华测量设备股份有限公司的柳涛等都提供了宝贵的资料,在此深表谢意。

由于编者水平有限,本书不足之处在所难免,敬请各位专家、读者批评指正。

编 者

目 录

前言

第1章 概论	1
1.1 齿轮及齿轮传动的分类	1
1.2 齿轮几何要素代号	2
1.3 齿轮传动的功能要求	6
1.4 齿轮误差的来源和误差的分类	7
1.5 齿轮精度标准及其发展概况	11
1.6 齿轮测量仪器的分类与选用	15
1.7 齿轮量仪与齿轮测量技术的发展与展望	16
1.8 我国齿轮测量仪器的现状	19
1.9 中国齿轮专业协会简介	21
第2章 渐开线圆柱齿轮的精度与检测	23
2.1 有关渐开线圆柱齿轮传动的基本概念	23
2.2 渐开线圆柱齿轮的齿廓设计	24
2.3 渐开线圆柱齿轮传动的几何尺寸计算	27
2.4 渐开线圆柱齿轮的精度	34
2.5 渐开线圆柱齿轮的检测	62
第3章 小模数渐开线圆柱齿轮的精度与检测	257
3.1 小模数齿轮基本齿廓与几何参数设计	257
3.2 小模数渐开线圆柱齿轮的精度	263
3.3 小模数渐开线圆柱齿轮的检测	288
第4章 锥齿轮的精度与检测	335
4.1 锥齿轮的基本齿廓	335
4.2 锥齿轮的模数系列	337
4.3 锥齿轮传动几何参数及其计算	338
4.4 锥齿轮的精度	358
4.5 锥齿轮的检测	390
第5章 小模数锥齿轮的精度与检测	427
5.1 小模数锥齿轮的基本齿廓	427
5.2 小模数锥齿轮的模数系列	427
5.3 小模数锥齿轮几何尺寸计算	428

5.4 小模数锥齿轮的精度	432
5.5 小模数锥齿轮的检测	445
第6章 齿条传动的精度与检测	452
6.1 齿条的基本齿廓	452
6.2 齿条传动的精度	453
6.3 齿条的检测	461
第7章 渐开线内啮合齿轮传动的精度与检测	465
7.1 内啮合齿轮的特点和分类	465
7.2 内啮合齿轮副的齿廓和几何参数计算	465
7.3 内啮合齿轮传动的精度	471
7.4 内啮合齿轮传动的检测	471
第8章 圆弧圆柱齿轮传动的精度与检测	488
8.1 圆弧圆柱齿轮传动的特点和应用	488
8.2 圆弧圆柱齿轮的术语及定义	488
8.3 双圆弧圆柱齿轮的基本齿廓	489
8.4 圆弧圆柱齿轮的模数系列	491
8.5 单圆弧圆柱齿轮基本齿廓	491
8.6 圆弧圆柱齿轮基本参数的选择与几何尺寸的计算	493
8.7 圆弧圆柱齿轮的精度	497
8.8 圆弧圆柱齿轮的检测	512
第9章 圆柱蜗杆传动的精度与检测	533
9.1 概述	533
9.2 圆柱蜗杆的基本齿廓	535
9.3 圆柱蜗杆传动的基本参数	535
9.4 圆柱蜗杆、蜗轮的精度	549
9.5 圆柱蜗杆的测量	577
9.6 蜗轮的测量	594
9.7 蜗杆副的检测	604
第10章 小模数圆柱蜗杆蜗轮传动的精度与检测	609
10.1 小模数圆柱蜗杆的基本齿廓和模数系列	609

10.2 小模数圆柱蜗杆、蜗轮及其传动的 几何参数及计算	610	12.4 圆柱蜗杆、蜗轮传动的测绘	687
10.3 小模数圆柱蜗杆、蜗轮及其传动的 精度	612	12.5 计时仪器用齿轮的测绘	693
10.4 小模数圆柱蜗杆、蜗轮及其传动的 检测	629	附录	698
第 11 章 计时仪器用齿轮传动的 精度与检测	634	附录 A $0^\circ \sim 59^\circ$ 渐开线函数表 ($\text{inv}\alpha =$ $\tan\theta - \theta$, 间隔: $1'$)	698
11.1 概述	634	附录 B $15^\circ \sim 30^\circ$ 渐开线函数表 ($\text{inv}\alpha =$ $\tan\theta - \theta$, 间隔: $10''$)	712
11.2 计时仪器用齿轮的模数系列和几何 参数	636	附录 C 斜齿圆柱齿轮的基圆半径表 ($m_n = 1\text{mm}$, $\alpha_n = 20^\circ$)	746
11.3 计时仪器用端面齿轮及其参数	646	附录 D 计算斜齿轮引用齿数的系数 $\left(C_M = \frac{1}{\cos^3\beta_f}\right)$	773
11.4 计时仪器用齿轮的精度	649	附录 E 齿轮测量常用常数表	776
11.5 计时仪器用齿轮的检测	653	附录 F 度分秒和弧度对照表	776
第 12 章 齿轮测绘	655	附录 G 度转化为分和秒	777
12.1 概述	655	附录 H 标准公差	778
12.2 渐开线圆柱齿轮的测绘	655	附录 I 本书引用的国家标准及行业标准	778
12.3 锥齿轮传动的测绘	676	参考文献	780

第 1 章 概 论

1.1 齿轮及齿轮传动的分类

齿轮及齿轮传动的类型繁多，表 1-1 给出的是常见的分类方法。更详细的分类见 GB/T 25509—2010 《机械系统和通用件 齿轮参考字典》。表 1-2 给出了常用各类齿轮传动的特点和适用范围。

表 1-1 齿轮及齿轮传动常见的分类方法

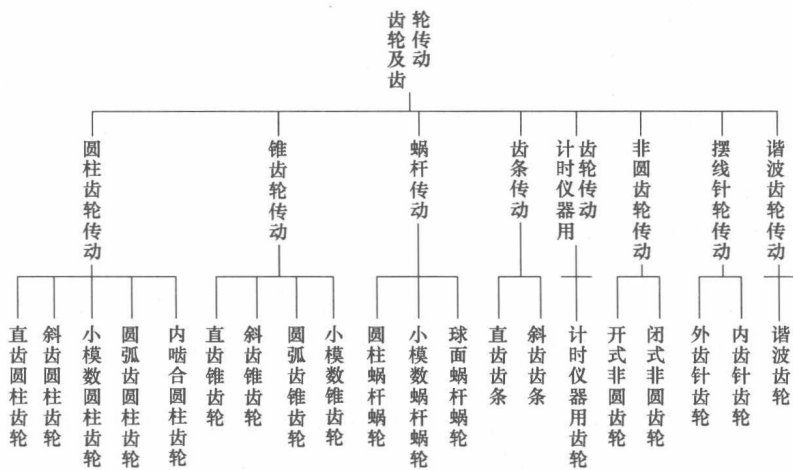


表 1-2 常用各类齿轮传动的特点和适用范围

齿轮传动类别	主要特点	适用范围			应用举例
		传动比	传递功率/kW	速度/m/s	
渐开线圆柱齿轮传动	传动的速度和功率范围很大,传动效率高,可达98%~99.5%。对中心距的敏感性小,装配与维修方便,加工精度高,可以进行变位切削及各种修缘、修形,以适应提高传动质量的要求	单级1~10 两级≤45 三级≤75	≤25000,最大可达10 ⁵	≤150 最高可达300	应用非常广泛,可用于所有的机械传动
圆弧齿轮传动	单圆弧齿轮传动 接触强度高;高传动效率;齿面磨损小而均匀;没有根切现象;不能做成直齿	单级1~10 两级45 三级75	高速可达6000 低速可达5000	≤100	高速传动用于鼓风机、制氧机、汽轮机;低速传动用于轧钢机、矿山机械、起重运输机等
	双圆弧齿轮传动 除具有单圆弧齿轮的优点,可用同一把滚刀加工一对齿轮;传动平稳;振动和噪声较小;抗弯强度比单圆弧齿轮高				
锥齿轮传动	直齿锥齿轮传动 轴向力小,比曲线锥齿轮制造容易;可制成鼓形齿	1~8	370	<5	用于机床、汽车、拖拉机及其他机械中轴线相交传动
	曲线锥齿轮传动 比直齿锥齿轮传动平稳,噪声小;承载能力大;由于螺旋角产生轴向力,转向变化时,此轴向力方向亦改变,轴承应考虑止推问题	1~8	3700	>5;≥40(需磨齿)	用于汽车驱动桥传动,机床、拖拉机等传动
准双曲面齿轮传动	比曲线锥齿轮传动更平稳;利用偏置距增大小轮直径,可以增加小轮刚度,实现两端支承;沿齿长方向有滑动,需用双曲面齿轮润滑油	1~10,用于代替蜗杆传动时可达50~100	735	>5	最广泛用于越野小客车,也用于货车

(续)

齿轮传动类别	主要特点	适用范围			应用举例
		传动比	传递功率/kW	速度/m/s	
蜗杆传动	普通圆柱蜗杆传动	8 ~ 80	≤ 200	13 ~ 35	多用于中小负荷、间歇工作的机器设备中
	圆弧圆柱蜗杆传动				
	球面蜗杆传动	5 ~ 100	≤ 4500	—	轧机压下装置、各种绞车、冷挤压机、转炉、军工产品及重型设备等
	锥蜗杆传动	10 ~ 359	—	—	适用于特定结构的场合

1.2 齿轮几何要素代号

GB/T 2821—2003《齿轮几何要素代号》规定了齿轮和齿轮装置的几何要素代号见表1-3。为统一技术文件和书籍中所用的代号创造了条件，并且和国际通用标准保持一致。本书全部采用这些代号。

本书有关“齿轮精度”和“齿轮检验”中使用的代号见表1-4。对于实测的各种误差、偏差在其公差、偏差代号前面加上“ Δ ”符号。例如， f_{pb} 为基圆齿距偏差允许值， Δf_{pb} 为基圆齿距实测偏差值。

表 1-3 齿轮几何要素代号

代号类别	字母类别	代号	代号含义
主代号	小写罗马字母 (斜体)	<i>a</i>	中心距
		<i>b</i>	齿宽
		<i>c</i>	顶隙和根隙
		<i>d</i>	直径,分度圆直径
		<i>e</i>	齿槽宽
		<i>g</i>	接触轨迹长度
		<i>h</i>	齿高(全齿高、齿顶高、齿根高)
		<i>i</i>	总传动比
		<i>j</i>	侧隙
		<i>k</i>	跨量齿数,跨量槽数(用于内齿轮)
		<i>m</i>	模数
		<i>n</i>	转速
		<i>p</i>	齿距,导程
		<i>q</i>	蜗轮的直径系数
		<i>r</i>	半径
		<i>s</i>	齿厚
		<i>u</i>	齿数比
		<i>v</i>	线速度,分度圆上的线速度

(续)

代号类别	字母类别	代号	代 号 含 义
主代号	小写罗马字母 (斜体)	x	径向变位系数
		y	中心距变动系数
		z	齿数
	大写罗马字母 (斜体)	M	量柱或量球的测量距
		P	径节
		R	锥距
		W	公法线长度
	小写希腊字母 (斜体)	α	压力角
		β	螺旋角
		γ	导程角
		δ	锥角
		ε	重合度
		η	槽宽半角
		θ	锥齿轮的齿形角
		ρ	曲率半径
		τ	齿距角,冠轮上的齿距角
		ϕ	作用角
		ψ	齿厚半角
	ω	角速度	
大写希腊字母(斜体)	Σ	轴交角	
复合 主代号	各种字母组合	d'	节圆直径
		d_a	齿顶圆直径
		d_b	基圆直径
		d_f	齿根圆直径
		h'	工作齿高
		h_a	齿顶高
		h_a^*	齿顶高系数
		$\overline{h}_a$	弦齿高、分度圆弦齿高
		h_{a0}	刀具齿顶高
		h_{a0}^*	刀具齿顶高系数
		$\overline{h}_c$	固定弦齿高
		h_f	齿根高
		h_0	刀具齿高
		$\text{inv}\alpha$	α 角的渐开线函数
		j_n	齿轮副的法向侧隙
		j_r	齿轮副的径向侧隙
		j_t	齿轮副的圆周侧隙
		P_z	导程
		R_i	内锥距
		R_m	中心锥距
		r_a	齿顶圆半径
		r_b	基圆半径
		r_f	齿根圆半径
		$\overline{s}$	弦齿厚,分度圆弦齿厚
		$\overline{s}_c$	固定弦齿厚
		x_t	切向变位系数
		z_v	当量齿数
		z_0	刀具齿数

(续)

代号类别	字母类别	代号	代号含义
复合 主代号	各种字母组合	δ'	节锥角
		δ_a	顶锥角
		δ_f	根锥角
		ε_α	端面重合度
		ε_β	纵向重合度
		ε_γ	总重合度
		θ_a	齿顶角
		θ_f	齿根角
		ϕ_α	端面作用角
		ϕ_β	纵向作用角
		ϕ_γ	总作用角
下标(除特殊注明者外均标注在主代号的右下角)	小写罗马字母 (正体)	a	齿顶的,齿顶高的
		b	基圆的,基圆柱的
		c	常值的,固定弦的
		e	外部的,大端的
		f	齿根的,齿根高的
		i	内部的,小端的
		k	跨齿数的,跨槽数的
		m	中点的,平均的
		max	最大的
		min	最小的
		n	法向的,法面上的
		r	半径的,径向的
		s	齿厚的
		t	切向的,端平面上的
		v	背锥上的,当量圆柱齿轮上的
		x	轴的,轴向的,轴平面上的
		y	任意圆柱面上的,任意圆锥面上的,任意点的
		z	齿的,齿数的,螺旋线的
	大写罗马字母 (正体)	L	左方的,左旋的
		M	量柱测量距的(M尺寸的)
		R	右方的,右旋的
	希腊字母 (正体)	α	端面重合的,压力角的,齿高方向的
		β	纵向重合的,螺旋角的,齿长方向的
		γ	总重合的
	阿拉伯数字 (正体)	0	刀具的
		1	小轮的,蜗杆的
		2	大轮的,蜗轮的
其他标记	特定符号	*(星号)	尺寸系数(尺寸和模数的比值,标注在主代号的右上角)
		'(一撇)	工作的、啮合的、节圆的、节圆锥的、节曲线上的(标注在主代号的右上角)
		"(两撇)	双面啮合的(标注在主代号的右上角)
		—(横线)	弦的(标注在主代号的正上方)

表 1-4 第 2 章中使用的代号

齿轮参数	含 义	单位	齿轮参数	含 义	单位
b	齿宽	mm	$f_{\beta m}^{①}$	平均螺旋角偏差	μm
d	分度圆直径	mm	F_p	齿距累积总偏差	μm
d_b	基圆直径	mm	$F_{pk}^{①}$	齿距累积偏差	μm
m, m_n	法向模数	mm	$F_{pkS}^{①}$	扇形齿距累积偏差	μm
m_t	端面模数	mm	F'_i	切向综合总偏差 (与测量齿轮啮合)	μm
p_n	法向齿距	mm	F_α	齿廓总偏差	μm
p_t	端面齿距	mm	F_β	螺旋线总偏差	μm
p_b, p_{bn}	法向基圆齿距	mm	d_{beff}	有效基圆直径	mm
p_{bt}	端面基圆齿距	mm	k	相继齿距数	—
S	扇形区齿距数	—	l	左旋	—
z	齿数	—	r	右旋	—
α, α_n	法向压力角	($^\circ$)	C_a	齿顶修缘	mm
α_t	端面压力角	($^\circ$)	$C_f^{①}$	齿根修缘	mm
β	蜗旋角	($^\circ$)	C_β	轮齿鼓度	mm
β_b	基圆螺旋角	($^\circ$)	$C_I (C_{II})$	在基准面 (非基准面) 的齿端修薄	mm
ε_α	端面重合度	—	L	左齿面	—
ε_β	纵向重合度	—	L_{AE}	有效长度	mm
ε_γ	总重合度	—	L_E	至有效齿廓起始点的基圆切线长度	mm
s_n	法向齿厚	mm	L_α	齿廓计值范围	mm
s_{nc}	法向弦齿厚	mm	L_β	螺旋线计值范围	mm
x	齿廓变位系数	—	$N \cdots$	齿、齿距序数	—
δ	棱柱 (砧) 半角	($^\circ$)	R	右齿面	—
η	齿槽半角	($^\circ$)	λ_β	波度曲线波长 (螺旋方向)	mm
ψ	齿厚半角	($^\circ$)	$\lambda_{\beta s}$	波度曲线轴向波长	mm
$f_{db}^{①}$	基圆直径偏差	μm	ξ	渐开线展开角	($^\circ$)
F_α	齿廓总偏差	μm	I (II)	基准面 (非基准面)	—
f_{dbm}	平均基圆直径偏差	μm	D_d	基准面直径	mm
$f_c (f_{cL}, f_{cR})$	齿轮轴线和轮齿 (或同侧齿面) 轴心线间的偏心量	mm	D_f	安装面直径	mm
f_{fa}	齿廓形状偏差	μm	$f_{\Sigma\delta}$	轴线平面内的轴线平行度偏差	μm
f_{fb}	螺旋线形状偏差	μm	$f_{\Sigma\beta}$	垂直平面上的轴线平行度偏差	μm
$f_{Ha}^{①}$	齿廓倾斜偏差	μm	D_M	测量用的球 (圆柱) 的直径	mm
$f_{Ham}^{①}$	平均齿廓倾斜偏差	μm	D_{Mthe}	测量用的球 (圆柱) 的理论直径	mm
$f_{H\beta m}^{①}$	平均螺旋线倾斜偏差	μm	E_{ani}	齿厚允许的下偏差	mm
f'_i	一齿切向综合偏差 (与测量齿轮啮合)	μm	E_{ans}	齿厚允许的上偏差	mm
f'_L	切向综合偏差的长周期分量	μm	F''_i	径向综合总偏差	μm
f'_s	切向综合偏差的短周期分量	μm	F_r	径向跳动	μm
f'	一齿传动偏差 (产品齿轮副)	μm	F''_r	综合测试得到的径向跳动	μm
$f_{pb}^{①}$	基圆齿距偏差	μm	M_d	跨球或圆柱 (销) 尺寸	mm
$f_{pbm}^{①}$	平均基圆齿距偏差	μm	W_k	公法线长度	mm
f_{pbt}	端面基圆齿距偏差	μm	Q	精度等级	—
$f_{ps}^{①}$	扇形区齿距偏差	μm	L	较大的轴承跨距	mm
f_{pt}	单个齿距偏差	μm	n	公差链中的链节数	—
$f_{w\beta}$	波度 (沿螺旋线)	μm	h_{c1}	接触斑点的较大高度	%
$f_\alpha^{①}$	压力角偏差 (标准)	μm	h_{c2}	接触斑点的较小高度	%
$f_{\alpha m}^{①}$	平均压力角偏差	μm	F_w	公法线长度变动量	μm
$f_\beta^{①}$	螺旋角偏差	μm	C_α	齿廓鼓度	mm

① 这些偏差项目可以是“+”(正)或“-”(负)。当尺寸大于设计值,偏差为正;反之,是负值。

1.3 齿轮传动的功能要求

齿轮传动是用来传递运动和动力的,它和任何机械零件一样,由于加工、制造、装配过程中不可避免地存在误差,因此使齿轮工件从几何学意义上来说总是存在以下四个方面的误差:

- 1) 尺寸偏差。其表现形式如齿轮齿厚、齿顶圆、齿根圆等尺寸不正确。
- 2) 形状误差。如齿廓不正确、螺旋线有误差等。
- 3) 相互位置误差。如齿距误差、齿向误差等。
- 4) 表面粗糙度。表现形式为轮齿工作表面等处的表面粗糙度不达标。

以上这四方面误差,由于齿轮是一个形态比较复杂的多参数零件,在具体检验、设计、分析时都统一地由齿轮精度标准来控制,并且为了检测的方便,提出了许多公差和偏差项目及指标,这些都是齿轮精度标准的核心内容。

从传递运动和动力考虑,齿轮传动应传递运动准确、平稳、灵活(不发卡、效率高),保证传动的承载能力。具体地说,对齿轮传动的功能要求可归纳成以下四个方面。

1. 传递运动的准确性

齿轮在一转范围内传动比变化要准确,其速比变化量要控制在一定范围内。它可以用齿轮一转范围内产生的最大转角误差来表示。如图 1-1a 所示的一对齿轮,若主动轮的齿距没有误差,而从动轮的齿距不均匀,则在主动轮转动一周过程中形成的最大转角误差 $\Delta\varphi_z = 7^\circ$,从而传动比产生最大变动量,传递运动不准确。

2. 传递运动的平稳性

齿轮的齿形本应是准确的渐开线才能保证瞬时速比恒定,传动才平稳。为此必须要求齿轮在转一齿范围内,瞬时传动比变动不超过一定的限度,这样齿轮传动才不会引起冲击、振动和噪声。此项要求可以用转一齿过程中的最大转角误差来表示,如图 1-1b 所示。与传动的准确性比较,它等于转角误差曲线上多次重复出现的小波纹的最大幅值。

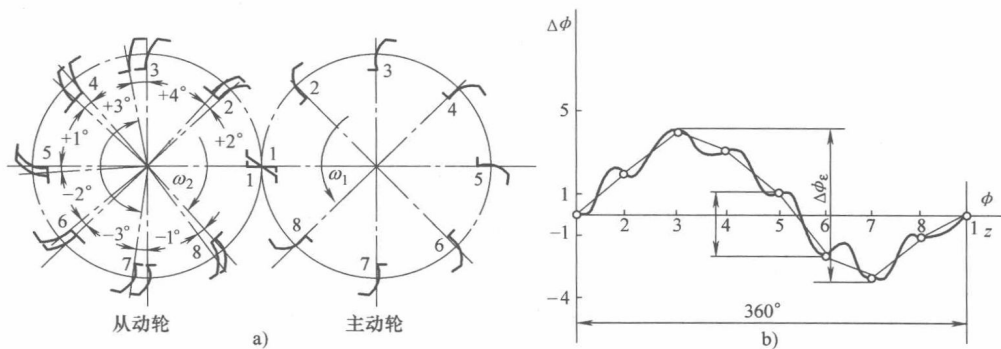


图 1-1 齿轮传递的运动

3. 载荷分布的均匀性

载荷分布的均匀性要求一对齿轮啮合时,工作齿面要保证一定的沿齿高、齿长方向的接触面积,从而避免应力集中,减少齿面磨损,提高齿面强度和寿命。此项要求可用接触斑点的大小和形状来控制,如图 1-2 所示。

4. 齿侧间隙(简称侧隙)的合理性

齿轮工作时都是单向齿廓工作的,即两个齿廓一个是工作齿廓,一个是非工作齿廓。在非工作齿面间应留有一定齿侧间隙,该侧隙可以沿啮合线度量(法向侧隙)如图 1-3 所示,也可沿圆

周方向度量（圆周侧隙）。齿侧间隙可以使齿轮传动灵活，储存润滑油，补偿齿轮受力变形、热变形和装配误差（如中心距误差）。

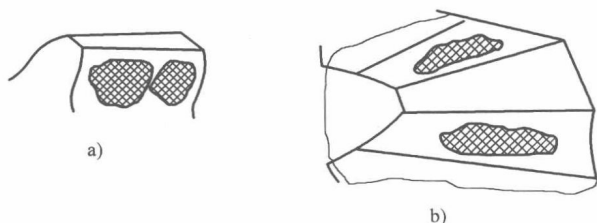


图 1-2 接触斑点

a) 直齿轮 b) 锥齿轮

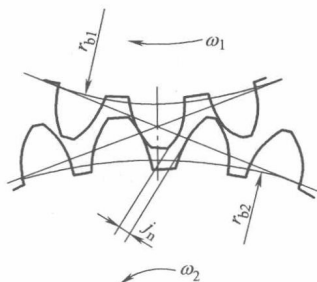


图 1-3 齿侧间隙

应该指出，对于不同用途的齿轮，以上四方面的精度要求并不一定完全一致。例如，仪表中用的分度、读数齿轮传动，其主要要求是传动比要准确，因此必须要求较高的传递运动的精度，而其他方面要求可低些。对于高速动力齿轮，如汽轮机减速器中的齿轮，其特点是转速很高，传动功率也大，因此必须要求较高的平稳性，使其振动、冲击和噪声尽量小些，同时对齿面接触精度也应有较高的要求。对于大功率的低速动力齿轮，如轧钢机、矿山机械、起重机用的齿轮，其特点是传递功率大，速比较低，这时其主要要求变为齿面接触良好，承载能力强，而对准确性、平衡性要求可适当放宽。至于侧隙要求对任何齿轮都应有一定要求，特别对于示数用的仪表齿轮，保证较小而均匀的侧隙尤为重要，否则将出现较大的回程误差。

以上所述的齿轮传动的四方面精度要求，均通过齿轮精度标准中规定各种精度指标来控制。

在齿轮精度标准中，常常把上述的 1、2、3 类要求划分为第 I、II、III 公差组，并且对每个公差组规定了几种不同的检验项目，以评定其传动质量。

齿侧间隙大小与齿轮精度没有直接的联系，但是对于精度高的齿轮，其最大侧隙和最小侧隙的变化范围要比低精度齿轮小。

1.4 齿轮误差的来源和误差的分类

渐开线齿轮的加工方法很多，如滚齿、插齿、剃齿、磨齿、拉齿、珩齿、成形铣刀铣齿等，其基本原理都是用齿轮刀具与齿轮毛坯进行共轭啮合，按照一对相互啮合的齿轮原理，在齿轮加工机床上切制出来的。因此，齿轮的种种误差的产生都与机床、毛坯、切齿刀具有关。

在诸多齿轮加工工艺中，展成法的滚齿加工是最常用的加工方法。图 1-4 所示为滚齿机加工圆柱齿轮的示意图。

齿轮毛坯套装在滚齿机工作台上的心轴上，并随滚齿机工作台一起旋转，与此同时，齿轮滚刀也作旋转，并且与齿轮毛坯形成共轭的啮合运动，从而切出齿廓来。调整滚刀轴线与齿轮轴线的轴间距即可控制被切齿轮的齿厚，而滚刀的上、下移动可切出齿长方向的齿廓来。

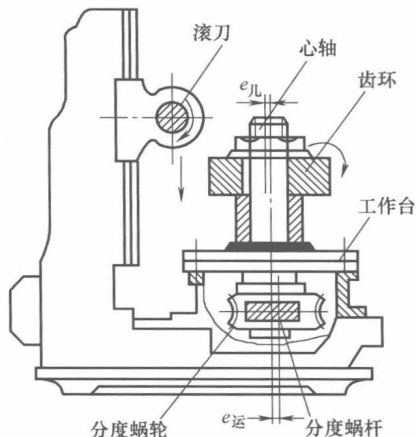


图 1-4 滚齿机加工圆柱齿轮的示意图

这样的—个加工系统由于机床、毛坯、刀具存在一定的误差，就使得加工的齿轮产生各种误差，其误差表现形式主要是造成齿轮在一转中齿距分布不均匀。

滚齿加工的误差总地来说可认为是加工中的偏心所造成的。具体地说可分为几何偏心 ($e_{\text{几}}$) 和运动偏心 ($e_{\text{运}}$) 两种。

几何偏心也称为安装偏心，它的产生是由于齿轮毛坯内孔与外圆本身不同心，或者齿轮内孔在安装时其中心线与机床的心轴不同心所致。这种偏心的存在，使实际齿轮齿顶圆各处到心轴中心（亦即加工时的回转中心）的距离不相等，从而使得加工的齿轮一边齿长，另一边齿短，如图 1-5a 所示。实质上是使齿轮的基圆产生了偏心，齿轮位置的几何中心产生了位移，从而使齿距分布不均匀。

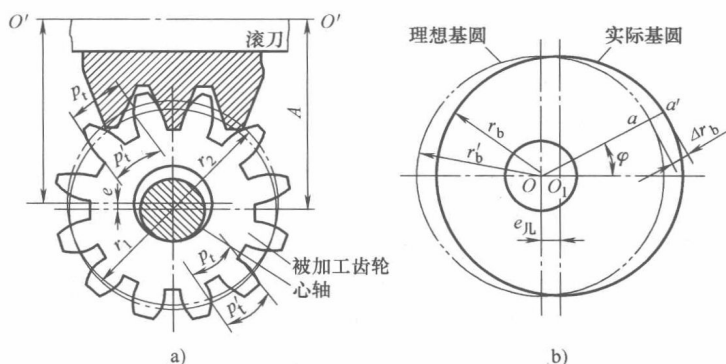


图 1-5 几何偏心引起的加工误差

如图 1-5b 所示，设齿轮的理想基圆半径为 r_b ，由于存在安装偏心，加工时齿轮即以心轴中心回转。显然，齿廓位置相对后者是均匀对称的，但相对齿轮本身的几何中心便产生了偏移。而加工后又以齿轮本身几何中心的分度圆测量齿距。此时基圆半径数值与 φ 角有关，基圆半径误差为

$$\Delta r_b = \overline{aa'} = e_{\text{几}} \cos \varphi \quad (1-1)$$

式中 $e_{\text{几}}$ ——几何偏心值（或安装偏心值）。

而某一微小角度所对应的基圆弧长误差为

$$\Delta L_b = \Delta r_b \Delta \varphi \quad (1-2)$$

则相应的分度圆弧长误差近似为

$$\Delta L = \frac{\Delta L_b}{\cos \alpha} = \frac{e_{\text{几}}}{\cos \alpha} \cos \varphi \Delta \varphi \quad (1-3)$$

由此可求得安装偏心引起的任意两圆各齿廓在分度圆上的位置误差为

$$\begin{aligned} \Delta p &= \frac{e_{\text{几}}}{\cos \alpha} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \cos \varphi d\varphi \\ &= \frac{e_{\text{几}}}{\cos \alpha} (\sin \varphi_2 - \sin \varphi_1) \end{aligned} \quad (1-4)$$

从工艺分析得知，当 $\varphi_1 = \pi/2$ 、 $\varphi_2 = 3\pi/2$ 时，任意两齿的齿距误差有最大值，即 Δp_{max} 为

$$\Delta p_{\text{max}} = \Delta F_{\text{p几}} = \frac{2e_{\text{几}}}{\cos \alpha} \quad (1-5)$$

式中 $\Delta F_{\text{p几}}$ ——由安装偏心引起的齿距累积误差。

除几何偏心引起的齿距分布不均匀外，还有运动偏心的影响。

运动偏心指机床整个传动环节所造成的机床分度蜗轮回转得不均匀,它相当于分度蜗轮产生了偏心(包括蜗轮本身安装偏心),如图1-6所示。运动偏心($e_{\text{运}}$)将使机床工作台回转得不均匀,亦即机床工作台相对刀具的回转角速度产生了周期性变化,从而使齿坯与刀具的啮合节点相对位置不断移动,如图1-6所示,结果也使被加工齿轮的实际基圆半径不断变化。当齿轮的回转角速度为最大($\omega + \Delta\omega$)时,节点下降,基圆半径变小,其最小值为

$$r_{\text{bmin}} = r_b - \Delta r_b = \frac{v_{\text{p刀}} \cos \alpha}{\omega + \Delta\omega} \quad (1-6)$$

式中 $v_{\text{p刀}}$ ——刀具在啮合点的速度。

当齿轮的回转角速度为最小($\omega - \Delta\omega$)时,节点上升,基圆半径变大,其最大值为

$$r_{\text{bmax}} = r_b + \Delta r_b = \frac{v_{\text{p刀}} \cos \alpha}{\omega - \Delta\omega} \quad (1-7)$$

这样,就相当于齿轮基圆对加工时的回转中心产生了偏移,其当量偏心值为

$$e_{\text{运}} = \frac{1}{2}(r_{\text{max}} - r_{\text{min}}) \quad (1-8)$$

由于运动偏心,使得加工后齿轮的实际齿廓位置沿以孔心为回转中心的圆周方向相对理想齿廓位置产生了歪斜和偏移(见图1-6b),从而产生了转角误差,由此得 $e_{\text{运}}$ 引起的齿距累积误差为

$$\Delta F_{\text{p运}} = r \Delta \varphi_{\Sigma} \quad (1-9)$$

式中 $\Delta \varphi_{\Sigma}$ ——分度蜗轮实际转角误差的最大值;

r ——被加工齿轮的分度圆半径。

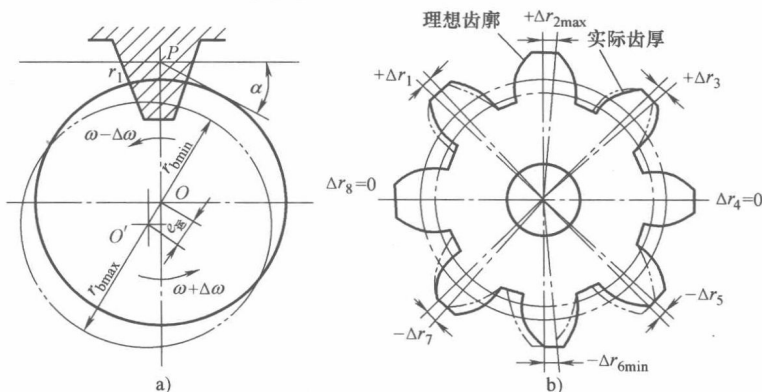


图1-6 运动偏心引起的加工误差

综上所述,无论是安装偏心,还是运动偏心,都将使齿距分布不均匀,产生齿距累积误差,这是两种影响因素综合作用的结果,其数值可通过统计法得到。但两者影响趋势是不同的,安装偏心影响齿廓位置沿径向方向变动,故称径向误差;而运动偏心是使齿廓位置沿圆周切线方向变动,故称切向误差。前者与被加工齿轮的直径无关,仅取决于安装误差的大小;对于后者,当齿轮加工机床精度一定时,将随齿坯直径的增加而增大。因此,测量齿轮的齿距累积误差,即可评定齿轮传递运动的准确性。

上述的齿轮误差在误差记录曲线上表现形式为以齿轮一转(2π 角度)为周期,所以也称为长周期误差。

在滚齿加工中,由于滚齿机分度蜗杆具有径向或轴向跳动,切齿刀具的齿形角误差、齿面直线度误差及其径向跳动误差而使得加工出来的基圆齿距(基节)和渐开线齿廓产生误差,因此使齿轮在换齿过程中和啮合过程中瞬时传动比不再恒定,从而引起传动的振动、噪声。由于该误差的周期为一个齿距内,因此也称短周期误差。

为了切出全齿长, 齿轮在切齿过程中, 齿轮刀具还要沿齿轮轴线方向移动。如果刀具的移动精度不高, 会引起齿轮齿向方面的误差, 或者螺旋线误差。

由于齿轮加工方法的多样性, 即便都是用展成法加工, 所产生的齿轮误差的来源和表现形式也不相同, 在此不再细说。齿轮加工误差的来源及相应的检验项目见表 1-5。更详细的推证和量化分析可参阅参考文献 [13]。

表 1-5 齿轮加工误差的来源及相应的检验项目

齿轮误差对其功能的影响	产生误差的主要来源			误差及其代号	误差的检验项目	
传递运动的准确性 (Ⅰ公差组)	径向误差	齿坯定位误差引起的几何偏心	加工心轴径向跳动与齿坯其准孔间配合间隙,齿坯校准圆与其准轴线不重合等引起齿坯基准轴线与机床工作台回转轴线的跳动	啮合线增量 $\Delta_r F$ 、 齿圈径向跳动 ΔF_r	F_r 、 F_i''	
			齿坯基准端面与基准轴线不垂直,或夹具支承端面对工作台回转轴线的跳动	啮合线增量 $\Delta_i F$		
		机床误差	大型切齿机工作台沿某一方向的周期摆动引起齿轮径向误差	双啮测量齿轮位移 ΔR		
			单个分度展成磨齿(钢带滚轮式)分度机构误差(齿槽或齿体双面磨削法)	齿圈径向跳动 ΔF_r		
	刀具误差	插齿刀(剃齿刀)径向跳动,安装偏心及刀轴跳动	齿轮啮合线增量 $\Delta_{ox} F$	F_i' 、 F_p	F_w	
	切向误差	机床误差引起运动偏心	连续(滚、插、蜗杆砂轮磨)与不连续(纳利斯型磨齿)展成法切齿时机床分度蜗轮偏心使工作台相对于刀具作周期性不均匀回转			运动偏心引起的啮合线增量 $\Delta_k F$ 公法线长度变动量 ΔF_w
			大型切齿机工作台周期摆动形成齿轮切向误差			测量齿条的切向位移 ΔT
		齿轮误差转化	剃齿后(自由展成法)齿轮几何偏心转化为运动偏心			剃齿后齿轮左、右啮合线增量 ΔF_{Ls} 、 ΔF_{Rs}
			插齿刀几何偏心引起的齿轮误差,在剃齿后转化为运动偏心			剃齿后齿轮左、右啮合线增量 ΔF_{Ls} 、 ΔF_{Rs}
	刀具误差	插齿刀运动偏心	运动偏心引起的啮合线增量 $\Delta_{ox} F$			
传递运动的平稳性 (Ⅱ公差组)	机床误差	切齿机分度蜗杆制造与安装误差(径、轴向跳动)引起的周期误差		齿轮啮合线增量 $\Delta_i F$,齿距偏差 Δf_{pt}	$f_i' f_{ip}$ (对宽斜齿轮)	f_i f_{pt}
		切齿机中间齿轮的周期误差		齿轮啮合线增量 $\Delta_n F$		
		机床分度盘齿距误差		基节偏差 Δf_{pb}	f_i'	$f_{pt} f_{pb}$ f_{pb}
		纳利斯型磨齿机展成丝杠误差影响		基节偏差 Δf_{pb}		
	刀具误差	滚刀产形面形状误差	滚刀(或砂轮、插齿刀等)齿形角误差	齿形误差 Δf_f	f_i'	$f_i f_{pb}$ f_f
			滚刀前面非径向性偏差	基节偏差 Δf_{pb}		
		滚刀螺旋线误差	容屑槽齿距偏差	齿形误差 Δf_f	f_i'	$f_i f_{pb}$ f_f
			容屑槽的螺旋角误差	齿形误差 Δf_f 基节偏差 Δf_{pb}		
			轴向齿距误差	齿形误差 Δf_f 基节偏差 Δf_{pb}		
			轴齿距误差	基节偏差 Δf_{pb}		
		滚刀安装误差	滚刀径向跳动(基圆跳动)	啮合线增量 $\Delta_{or} F$		f_i
			滚刀轴向窜动误差	啮合线增量 $\Delta_{or} F$		
	滚齿面棱形度	因滚刀刀数有限形成齿端面棱形度	棱形度 γ	$f_i f_i'$		

(续)

齿轮误差对其功能的影响	产生误差的主要来源			误差及其代号	误差的检验项目		
载荷分布的均匀性 (Ⅲ公差性)	齿长方向 (轴向误差)	滚刀轴向进给形成齿侧面不平度		齿顶法向波纹高度 x_n	$F_\beta、F_b$		
		机床刀架导轨倾斜	在纵向平面内	接触线误差 ΔF_b 和齿向误差 ΔF_β	F_b	F_β	F_{px} (宽斜齿轮)
			在横向平面内				
		齿坯基准端面跳动等引起齿坯基准轴对机床工作台回转轴线的歪斜		齿向误差 ΔF_β			
		切齿机差动链的调整误差	窄斜齿轮	窄斜齿轮螺旋线误差 ΔF_β			
			宽斜齿轮	宽斜齿轮轴向齿距偏差 ΔF_x			
	机床进给丝杠轴向窜动等引起齿面波度(其累积误差影响接触线趋势误差)		齿 轮 波 度 误 差 $\Delta_s F_\beta$			$f_{i\beta}$	
	齿高方向	刀具、砂轮齿形角(包括齿形)误差, 滚刀的轴、径向跳动等	直齿轮	齿向误差 ΔF_β		$f_f、f_{pb}$	
			窄斜齿轮	齿向误差 ΔF_β 或 接触线误差 ΔF_{pb}			
			宽斜齿轮	轴 向 齿 距 偏 差 ΔF_{px} 、接 触 线 误 差 ΔF_b	$f_b、f_{pb}$		

1.5 齿轮精度标准及其发展概况

1. 齿轮精度标准的历史沿革

齿轮精度标准,一直和生产的发展密切相关,它们是互相推动的。生产力的发展促成了齿轮精度的不断完善,而齿轮精度的不断完善和更新换代又进一步推动了切齿机床、齿轮刀具和齿轮量仪及齿轮检测技术的进步。

追溯历史,18世纪初法国最早研制出铣齿刀。尤拉(L. Euler)对渐开线作为齿形进行了研究和论述,为渐开线齿形的广泛使用起到了开拓作用。卡蒙斯(M. Camns)建立了齿轮接触点轨迹的概念,即齿廓啮合定律,它至今仍在齿轮设计和制造中起着举足轻重的作用。之后与成型法切齿技术出现的同时,亦出现了使用靠模的仿形切齿方法。直到1887年才由德国设计出世界上第一台有差动齿轮机构的滚齿机,它在1900年获得专利之后便成为了现代滚齿机的代表产品。

随着机器制造业的发展,互换性成为制造厂家和用户所普遍关心的问题,判断齿轮的制造质量促进了齿轮量仪和检测技术的发展和进步。1922年研制出周节仪,1926年马格(MAAG)公司制成了手提式基节仪,1931年研制出导程仪,接着有了齿厚测量技术。有了这些基础,在1932年首个齿轮公差标准才在英国制定出来,其标准号是BS 436—1932。

初期的齿轮精度标准将齿轮误差概念建立在几何的基础上,从单个齿轮和齿轮形状、位置、齿厚等规定齿轮的误差项目。按照这种概念确定的主要误差项目有:齿距误差、齿形误差、齿向误差和齿厚偏差。这个时期的齿轮标准有:英国BS 436—1940,美国齿轮制造者协会标准AGMA 231.02—1941,德国企业工程师协会标准ADB的提案,前苏联国家标准ГОСТ 1643-46,法国标准NFE 23-006(1948)等。这个时期标准的主要特点是规定的等级较少,只有4~5个等级。从几何学观点规定齿距、齿形、齿向、齿厚等单项误差和与安装偏心有关的齿轮径向跳动等误差,按极其简单的模式来确定各项公差值。