

高等学校教学参考书

齿轮承载能力分析

朱孝录 鄂中凯 主编

Analysis
of Load
Capacity of Gears

高等教育出版社

711 1324
6.7
高等学校教学参考书

齿轮承载能力分析

蔡春源 刘志善 曹仁政
傅德明 鄂中凯 冯澄宙 编著
马先贵 何德芳 朱孝录
朱孝录 鄂中凯 主编

高等教育出版社

内 容 提 要

本书阐明了现代齿轮承载能力计算的基本原理,对 ISO、GB、DIN、AGMA、JGMA、ГОСТ 等主要齿轮承载能力计算方法的理论、有关系数、数据作了对比分析,介绍了渐开线圆柱齿轮承载能力计算方法。本书编入了国内外齿轮承载能力计算的最新资料、图表和有关数据,以便读者使用。

本书内容包括齿轮的载荷分析,齿面接触强度、齿根弯曲强度、轮齿胶合承载能力分析和承载能力计算方法,轮齿损伤分析,齿轮试验等。

本书可作为高等工科院校有关专业师生的教学参考书,并可作为齿轮方面研究生的教材,也可供从事机械设计、制造的工程技术人员,尤其是齿轮技术工作者参考。

本书责任编辑 马盛明

(京)112号

高等学校教学参考书
齿轮承载能力分析
朱孝录 鄂中凯 主编

*

高等教育出版社出版
新华书店北京发行所发行
河北省香河县印刷厂印装

*

开本 787×1092 1/16 印张 27.25 插页 6 字数 620 000

1992 年 8 月第 1 版 1992 年 8 月第 1 次印刷

印数 0001—2 744

ISBN 7-04-001073-9/TH·167

定价 14.20 元

前 言

自 18 世纪工业革命以来, 齿轮技术一直在迅速发展, 尤其是近 30 年以来齿轮技术的各个方面都有了很大进展, 国际上齿轮技术已达到相当高的水平。现代工业生产对齿轮传动提出了越来越高的要求, 这些要求主要是高承载能力、高性能、高可靠性、体积小、重量轻。为了达到这些要求, 一方面要提高齿轮的加工精度, 改善齿轮的材料和热处理方法以提高其机械性能; 另一方面则必须有一种精确的齿轮承载能力计算方法, 以保证齿轮在接近最大许用载荷的情况下工作。关于齿轮承载能力计算方法, 近 10 多年来有了重大的进展。这主要体现在以下两个方面。一方面是现代齿轮承载能力计算方法应用了近代数学、力学、材料学及现代设计理论的新成果。另一方面是在 70 年代中期, 国际标准化组织 (ISO) 第 60 技术委员会第 6 工作组 (ISO/TC60/WG6) 经过 10 多年时间酝酿后公布了“直齿轮和斜齿轮承载能力计算的基本原则”标准草案 (ISO/TC60/WG6 199E~202E)。此草案虽然尚不够成熟, 也不尽完善, 但是它以严密的系统、理论同实践相结合和全面考虑多种因素而为世人所瞩目。ISO 标准草案公布后, 许多国家, 如我国、联邦德国、美国、日本、苏联等都先后制订和修改了自己的齿轮承载能力计算标准。

在“积极采用国际标准”这一技术经济政策的指导下, 以 ISO 标准为基础, 我国也先后制订了“渐开线圆柱齿轮承载能力计算方法”国家标准 (GB3480—83) 和“渐开线圆柱齿轮胶合承载能力计算方法”国家标准 (GB6413—86), 并正在着手制订圆锥齿轮的承载能力计算国家标准及有关行业性的子标准。

随着现代齿轮承载能力计算方法研究工作的迅速发展以及 ISO 标准和我国标准的制订, 就有一个学习、研究和应用现代齿轮承载能力计算方法的任务。

为了适应广大齿轮技术工作者、研究人员及齿轮方面的研究生工作和学习的需要, 也为了使广大的齿轮技术工作者能更深入地理解 ISO 及我国标准的内容, 了解现代齿轮承载能力计算方法的原理及基本试验技术, 我们编写了这本书。

本书的齿轮承载能力分析 & 计算部分的编写以 ISO 标准及 GB3480—83 为主要依据, 但也综合分析了 DIN、AGMA、JGMA、ГОСТ 等标准的有关内容。在编写方法上着眼于理论分析、论证和对比而不局限于设计计算方法。

本书的齿轮损伤分析部分的编写以 GB3481—83 为主要依据, 但着重于损伤机理的分析和防止损伤的对策的探讨, 而不局限于一般损伤形式的介绍。

理论研究同试验紧密结合是现代齿轮承载能力研究的特征之一。因此, 在本书的第 10 章中除编入了一般的齿轮试验方法外, 还着重编入了一些齿轮的最新试验技术。

本书编入了作者及国内外齿轮研究工作者近期的研究成果及新的技术资料, 这有助于读者了解齿轮技术的最新发展。

齿轮承载能力分析涉及面很宽,它不仅包括圆柱齿轮承载能力分析,而且还包括圆锥齿轮、圆弧齿轮、蜗杆传动、行星齿轮传动等承载能力分析。由于篇幅限制,本书仅编入渐开线圆柱齿轮的承载能力分析。渐开线圆柱齿轮的承载能力分析在各种齿轮的承载能力分析中具有典型性和代表性,掌握了它,其它齿轮的承载能力分析也就容易了。

本书由朱孝录、鄂中凯主编。参加编著工作的人员有:东北工学院蔡春源(第1章),华中工学院刘志善(第2章),北京钢铁学院曹仁政(第3章)、傅德明(第4章),东北工学院鄂中凯(绪论、第5章),郑州工学院冯澄宙(第6章),东北工学院马先贵(第7章)、何德芳(第8章),北京钢铁学院朱孝录(第9、10章),山东工业大学王寿佑参加了第2章轮齿刚度分析一节的编写工作。北京钢铁学院杨明参加了部分内容的整理工作。全书插图由北京钢铁学院解乃如描绘。

本书承蒙哈尔滨工业大学陈谌闻教授审阅,他对本书提出了很多宝贵意见,作者深表感谢。

本书在编写过程中,得到了《渐开线圆柱齿轮承载能力计算方法》国家标准工作组及齿轮界很多同行的大力支持,在此谨致谢意。

限于我们水平,书中缺点和错误在所难免,希广大读者批评指正。

作 者

1987年10月

主要代号表

本书所用代号的说明

世界各国在齿轮的有关标准和齿轮的承载能力计算公式中使用的代号有很大不同, 这给齿轮工作者带来很多不便。ISO/TC60 对齿轮的名词术语和代号制订了统一的标准, 但是要各国都使用这些代号还需很长时间。所以, 本书在一般论述中使用ISO代号, 即GB代号; 而在引用各国的强度计算公式时, 均保留原标准的符号, 这是因为考虑到各表达式中系数的定义、内容不尽相同, 如使用统一符号反而导致概念混淆, 另外这样也有利于读者对照参阅原文的外国标准。

本书一般论述中所用的主要代号及角标代号见表1及表2。本书经常引用的几个强度计算标准中所采用系数的代号见表3及表4。

表1 代号^{[1][2][3][12][42]}

代 号	意 义	单 位
a	中心距, 标准齿轮及高变位齿轮的中心距	mm
a'	角变位齿轮的中心距	mm
b	齿宽	mm
b_{cal}	计算齿宽	mm
C	节点; 系数	
C_s	齿顶修缘量	μm
C_{ay}	由跑合产生的齿顶修缘量	μm
c	比热	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
c_y	轮齿单位齿宽总刚度平均值(啮合刚度)	$\text{N}/(\text{mm} \cdot \mu\text{m})$
c'	一对轮齿的单位齿宽的最大刚度(单对齿刚度)	$\text{N}/(\text{mm} \cdot \mu\text{m})$
d	直径	mm
d_1, d_2	小齿轮、大齿轮的分度圆直径	mm
d'_1, d'_2	小齿轮、大齿轮的节圆直径	mm
d_{a1}, d_{a2}	小齿轮、大齿轮的齿顶圆直径	mm
d_{b1}, d_{b2}	小齿轮、大齿轮的基圆直径	mm
d_{f1}, d_{f2}	小齿轮、大齿轮的齿根圆直径	mm
E	弹性模量(杨氏模量)	N/mm^2
e	辅助量	
F_{bn}	法面内基圆周上的名义切向力	N
F_{bt}	端面内基圆周上的名义切向力	N

续表

代 号	意 义	单 位
F_t	端面内分度圆周上的名义切向力	N
F_β	齿向公差	μm
$F_{\beta x}$	初始啮合齿向误差	μm
$F_{\beta y}$	跑合后的啮合齿向误差	μm
f_f	齿形公差	μm
f_{pb}	基节极限偏差	μm
f_{pt}	周节极限偏差	μm
G	切变模量(剪变模量)	N/mm^2
g_a	端面啮合线长度	mm
HB	布氏硬度	
HRC	洛氏硬度	
HV1	$F=9.8\text{N}$ 时的维氏硬度	
HV10	$F=98.1\text{N}$ 时的维氏硬度	
h	齿高	mm
h_{Fa}	载荷作用于齿顶时的弯曲力臂	mm
$h_{F\alpha}$	载荷作用于单对齿啮合区上界点时的弯曲力臂	mm
h_a	齿顶高	mm
h_a^*	齿顶高系数	
h_{a0}	刀具基本齿廓齿顶高	mm
$h_{\min}$	最小油膜厚度	μm
K_A	使用系数	
K_{Ba}	胶合计算的齿间载荷分配系数	
$K_{B\beta}$	胶合计算的齿向载荷分布系数	
$K_{B\gamma}$	胶合计算的螺旋线载荷分布系数	
K_{Fa}	弯曲强度计算的齿间载荷分配系数	
$K_{F\beta}$	弯曲强度计算的齿向载荷分布系数	
K_{Ha}	接触强度计算的齿间载荷分配系数	
$K_{H\beta}$	接触强度计算的齿向载荷分布系数	
K_v	动载系数	
L	长度	mm
M	弯矩	$\text{N}\cdot\text{m}$
m	模数;单位齿宽当量质量	$\text{mm}; \text{kg}/\text{mm}$
m_n	法向模数	mm
m_{red}	单位齿宽诱导质量	kg/mm
m_t	端面模数	mm
N	临界转速比;指数	
N_L	应力循环次数	
N_∞	应力循环基数	
n_1, n_2	小齿轮、大齿轮的转速	r/min

续表

代 号	意 义	单 位
n_{E1}	小齿轮的临界转速	r/min
P	功率	kW
P_{bn}	法向基圆齿距(法向基节)	mm
P_{bt}	端面基圆齿距(端面基节)	mm
$p_{n \max}$	最大接触压力(Hertz接触压力)	N/mm ²
Q	发热量	J
q	辅助系数	
	单位齿宽柔度	$\mu\text{m}\cdot\text{mm}/\text{N}$
q_s	齿根圆角参数	
R_a	轮廓算术平均偏差	μm
R_z	微观不平度十点高度	μm
r	半径,分度圆半径	mm
S_B	按闪温准则计算的安全系数	
$S_{B\min}$	按闪温准则计算的最小安全系数	
S_F	弯曲强度的计算安全系数	
$S_{F\min}$	弯曲强度的最小安全系数	
S_H	接触强度的计算安全系数	
$S_{H\min}$	接触强度的最小安全系数	
S_{Sint}	按积分温度准则计算的安全系数	
$S_{\text{Sint min}}$	按积分温度准则计算的最小安全系数	
s	齿厚;接触区宽度之半;尺寸	mm
s_{Fn}	危险截面上的弦齿厚	mm
T_1, T_2	小齿轮、大齿轮的名义转矩	N·m
u	齿数比 $u = z_2/z_1 \geq 1$	
v	线速度,分度圆圆周速度	m/s
w_m	单位齿宽平均载荷	N/mm
$w_{\max}$	单位齿宽最大载荷	N/mm
w_n	单位接触线长法向载荷	N/mm
X_B	几何系数	
X_{Ca}	齿顶修缘系数	
X_M	热闪系数	
X_Q	啮入冲击系数	
X_R	胶合计算的粗糙度系数	
X_W	焊接系数	
X_α	压力角系数	
X_β	胶合计算的螺旋角系数	
X_ϵ	胶合计算的重合度系数	
X_η	润滑油粘度系数	
X_f	沿啮合线的载荷分配系数	

续表

代 号	意 义	单 位
x	位置的坐标;变位系数	
x_1, x_2	小齿轮、大齿轮的法向变位系数	
Y_F	载荷作用于单对齿啮合区上界点的齿形系数	
Y_{Fa}	载荷作用于齿顶的齿形系数	
Y_{FS}	载荷作用于齿顶时的复合齿形系数	
Y_N	齿轮弯曲强度计算的寿命系数	
Y_{NT}	试验齿轮弯曲强度计算的寿命系数	
Y_{RelT}	相对齿根表面状况系数	
Y_S	载荷作用于单对齿啮合区上界点时的应力修正系数	
Y_{Sa}	载荷作用于齿顶时的应力修正系数	
Y_{ST}	试验齿轮的应力修正系数	
Y_X	弯曲强度计算的尺寸系数	
$Y_{\sigma RelT}$	相对齿根圆角敏感系数	
y	位置的坐标	
y_a	齿廓跑合量	μm
y_β	齿向跑合量	μm
Z_B	小齿轮的单齿啮合系数	
Z_E	弹性系数	$\sqrt{\text{N/mm}^2}$
Z_H	节点区域系数	
Z_L	润滑剂系数	
Z_N	齿轮接触强度计算的寿命系数	
Z_N	试验齿轮接触强度计算的寿命系数	
Z_R	接触强度计算粗糙度系数	
Z_v	速度系数	
Z_W	齿面工作硬化系数	
Z_X	接触强度计算的尺寸系数	
Z_β	接触强度计算的螺旋角系数	
Z_ϵ	接触强度计算的重合度系数	
z	齿数;位置的坐标	
z_1, z_2	小齿轮、大齿轮的齿数	
z_{v1}, z_{v2}	斜齿轮的小轮、大轮的当量齿数	
z_0	插齿刀齿数	
α_{Fan}	齿顶法向载荷作用角	$^\circ, \text{rad}$
α_{Fat}	齿顶端面载荷作用角	$^\circ, \text{rad}$
α_{Fen}	单对齿啮合区上界点处的法向压力角	$^\circ, \text{rad}$
α_{Fat}	单对齿啮合区上界点处的端面压力角	$^\circ, \text{rad}$
α_n	法向压力角(法向分度圆压力角)	$^\circ, \text{rad}$
α_t	端面压力角(端面分度圆压力角)	$^\circ, \text{rad}$
α_i	端面啮合角	$^\circ, \text{rad}$

续表

代 号	意 义	单 位
α_0	刀具齿形角	$^{\circ}, \text{rad}$
β	分度圆螺旋角	$^{\circ}, \text{rad}$
β_b	基圆螺旋角	$^{\circ}, \text{rad}$
γ	辅助角	$^{\circ}, \text{rad}$
ε_a	端面重合度	
$\varepsilon_{a\alpha}$	斜齿轮当量齿轮的端面重合度	
ε_β	纵向重合度	
ε_γ	总重合度	
η	效率	
	润滑油动力粘度	$\text{mPa}\cdot\text{s}$
θ_1, θ_2	小轮、大轮的转动惯量	$\text{kg}\cdot\text{mm}^2$
θ_B	瞬时接触温度	$^{\circ}\text{C}$
θ_{fla}	闪点温度	$^{\circ}\text{C}$
$\theta_{fla\text{ int}}$	沿啮合线的平均闪点温度	$^{\circ}\text{C}$
θ_{int}	积分温度	$^{\circ}\text{C}$
θ_M	本体温度	$^{\circ}\text{C}$
θ_{oil}	油温	$^{\circ}\text{C}$
θ_0	按闪温准则考虑的胶合温度	$^{\circ}\text{C}$
$\theta_{\Sigma int}$	按积分温度准则考虑的胶合温度	$^{\circ}\text{C}$
λ	导热系数	$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
λ_m	平均接触线长度变化率	
λ_{max}	最大接触线长度变化率	
λ_{min}	最小接触线长度变化率	
μ	摩擦系数	
μ_{my}	平均局部摩擦系数	
ν	润滑油运动粘度	$\text{mm}^2/\text{s}(\text{cSt})$
	泊松比	
ρ	密度	kg/mm^3
	曲率半径	mm
ρ_{a0}	基本齿条齿顶圆角半径	mm
ρ_f	危险截面处齿根圆角半径	mm
ρ_{red}	综合曲率半径	mm
σ_b	抗拉强度	N/mm^2
σ_F	计算齿根应力	N/mm^2
σ_{F0}	计算齿根应力基本值	N/mm^2
σ_{FP}	许用齿根应力	N/mm^2
σ_{Flim}	试验齿轮的弯曲疲劳极限	N/mm^2
σ_H	计算接触应力	N/mm^2
σ_{HB}	单对齿啮合区下界点处的计算接触应力	N/mm^2

续表

代 号	意 义	单 位
σ_{H0}	计算接触应力基本值	N/mm^2
σ_{H0B}	单对齿啮合区下界点处的接触应力基本值	N/mm^2
σ_{HP}	许用接触应力	N/mm^2
σ_{Hlim}	试验齿轮的接触疲劳极限	N/mm^2
σ_s	屈服强度	N/mm^2
τ	剪应力	N/mm^2
τ_{max}	最大剪应力	N/mm^2
ω_1, ω_2	小轮、大轮的角速度	rad/s

表 2 下角标('及*为右上角标) [1][2][3][12][42]

代 号	意 义	代 号	意 义
a	齿顶高的, 齿顶的	n	法向的
B	单对齿啮合区下界点的	oil	油的
b	基圆的	P	许用的
cal	计算的	r	径向的
d	动载的	red	当量的, 转化的
e	单对齿啮合区上界点的	S	静的
eff	有效的	T	试验齿轮的
F	与齿根应力有关的	t	切向的, 端面的
f	齿根高的, 齿根的	v	斜齿轮当量齿轮的
fla	瞬时的, 闪点的	x	轴向的
H	与接触应力有关的	0	基本值, 刀具的
int	积分的	1	小齿轮的
lim	极限的	2	大齿轮的
m	平均的	'	节圆的, 啮合的
max	最大的	*	尺寸系数的(尺寸与模数的比值)
min	最小的		

表 3 齿面接触强度的几个标准计算式中所采用的系数^{[3][12][25][41][44]}

名 称	ISQ, GB, DIN 式	AGMA 式	JGMA 式	ГОСТ 式
节点区域系数	Z_H		Z_H	Z_H
弹性系数, 材料系数	Z_E	C_p	Z_M	Z_M
螺旋角系数	Z_β		Z_β	
重合度系数	Z_ϵ	m_N	Z_ϵ	Z_ϵ
几何系数		$I = \frac{C_C C_X C_\psi^2}{m_N}$		
节点处曲率系数		C_C		
接触高度系数		C_X		
螺旋角重合度系数		C_ψ		
使用系数	K_A	C_A		
过载系数			K_O	
动载系数	K_v	C_v	K_v	K_{Hv}
齿向载荷分布系数	$K_{H\beta}$	C_{mf}	$K_{H\beta}$	$K_{H\beta}$
齿间载荷分配系数	$K_{H\alpha}$	C_{mt}		$K_{H\alpha}$
接触疲劳极限	σ_{Hlim}	S_{ac}	σ_{Hlim}	σ_{Hlim}
寿命系数	Z_N	C_L	K_{HL}	K_{HL}
润滑剂系数	Z_L		Z_L	Z_L
速度系数	Z_v		Z_v	Z_v
粗糙度系数	Z_R		Z_R	Z_R
表面状况系数		C_f		
工作硬化系数	Z_W		Z_W	
硬度比系数		C_H		
尺寸系数	Z_X	C_S	K_{HX}	K_{XH}
温度系数		C_T		
安全系数	S_H	C_R	S_H	S_H

表4 齿根弯曲强度的几个标准计算式中所采用的系数^{[3][12][25][43][44]}

名 称	ISO, GB, DIN 式	AGMA 式	JGMA 式	ГОСТ 式
齿形系数	Y_F, Y_{Fa}	Y	Y_F	Y_F
齿根应力修正系数	Y_S, Y_{Sa}	K_f	Y_S	
重合度系数	Y_ϵ	m_N	Y_ϵ	Y_ϵ
螺旋角系数	Y_β	C_h	Y_β	Y_β
螺旋角重合度系数		K_ψ		
几何系数		$J = \frac{YC_h}{K_fm_N}$		
使用系数	K_A	K_a		
过载系数			K_0	
动载系数	K_v	K_v	K_v	K_{Fv}
齿向载荷分布系数	$K_{F\beta}$	K_{mf}		$K_{F\beta}$
齿间载荷分配系数	$K_{F\alpha}$	K_{mt}		K_{Fa}
弯曲疲劳极限	σ_{Flim}	S_{at}	σ_{Flim}	σ_{Flim}
寿命系数	Y_{NT}	K_L	K_L	K_{HL}
试验齿轮的应力修正系数	Y_{ST}			
应力集中系数				Y_S
相对齿根圆角敏感系数	$Y_{\delta relT}$			
相对齿根表面状况系数	$Y_{R relT}$			
齿根过渡表面粗糙度系数				Y_R
齿根过渡表面磨削影响系数				K_{Fg}
齿根过渡表面强化或化学处理影响系数				K_{Fd}
温度系数		K_T		
双向受载影响系数				K_{FC}
尺寸系数	Y_X	K_S	K_{FX}	K_{XF}
安全系数	S_F	K_R	S_F	S_F

目 录

主要代号表	1	4-5 齿间载荷分配系数	130
绪论	1	4-6 $\varepsilon_\gamma > 2$ 时的载荷分配问题	133
0-1 概述	1	4-7 齿间载荷分配系数的简化处理	135
0-2 齿轮承载能力计算准则和计算方法的进展	2	第5章 齿面接触强度分析	139
0-3 齿轮承载能力计算标准的制订情况	4	5-1 概述	139
0-4 齿轮试验技术的进展	6	5-2 接触应力分析	143
第1章 齿轮的外载荷	8	5-3 齿面接触应力计算	153
1-1 名义载荷	8	5-4 许用接触应力	168
1-2 载荷图谱	10	5-5 齿面接触强度计算	182
1-3 当量载荷	15	5-6 表面硬化齿轮齿面剥落计算研究的进展	183
1-4 使用系数	17	第6章 轮齿弯曲强度分析	191
1-5 各主要计算方法对工况的处理方式	19	6-1 概述	191
第2章 齿轮的动载荷	25	6-2 齿根应力分析	193
2-1 概述	25	6-3 按平截面法计算齿根应力	210
2-2 轮齿的刚度分析	26	6-4 许用齿根应力	232
2-3 动载的冲击理论	42	6-5 齿根弯曲强度计算	243
2-4 动载的振动理论	51	6-6 其它一些参数对齿根弯曲强度的影响	244
2-5 其它标准的动载系数确定方法简介	66	第7章 轮齿胶合承载能力分析	251
第3章 齿向载荷分布	69	7-1 概述	251
3-1 概述	69	7-2 ISO 胶合计算方法	252
3-2 按照 ISO 观点对载荷分布系数的分析	70	7-3 润滑参数计算方法	272
3-3 按照 AGMA 观点对载荷分布系数的分析	84	第8章 齿轮轮齿损伤分析	287
3-4 按照 JSME 观点对载荷分布系数的分析	87	8-1 齿轮损伤的基本类型和影响因素	287
3-5 对 ISO、AGMA 和 JSME 载荷分布系数的比较与综合	89	8-2 轮齿折断	289
3-6 J. Timmers 的论述	93	8-3 齿面疲劳	304
3-7 J. Rademacher 的研究	101	8-4 胶合	310
3-8 Л. Л. Часовников 的论述	104	8-5 齿面磨损	312
第4章 齿间载荷分配	116	8-6 轮齿塑性变形	314
4-1 概述	116	8-7 其它损伤	317
4-2 齿间载荷分配系数的定义	118	8-8 轮齿损伤分析方法简介	320
4-3 影响齿间载荷分配的主要因素	122	第9章 齿轮的材料、寿命系数和极限应力	324
4-4 载荷分配率的分析	125	9-1 齿轮的材料和热处理方法的选择	324
		9-2 齿轮的疲劳曲线和寿命系数	331

9-3	齿轮的疲劳极限.....	339	10-5	齿轮胶合与油品承载能力试验.....	387
9-4	轮齿的静强度极限值和少循环疲劳 极限值.....	355	10-6	齿轮的磨损试验.....	390
第10章	齿轮的试验	359	10-7	齿轮疲劳强度快速试验法.....	392
10-1	概述.....	359	10-8	齿轮动载荷的测定.....	396
10-2	静态加载和脉动加载的轮齿弯曲强 度试验.....	360	10-9	齿向载荷分布的测试.....	402
10-3	运转式齿轮试验装置.....	363	10-10	齿轮本体温度和齿面温度的测试.....	404
10-4	运转式齿轮疲劳试验.....	385	10-11	齿轮运行状态和失效的监测.....	409
				标准、参考文献	411
				第8章 齿轮损伤照片	421

绪 论

0-1 概 述

齿轮传动是机械中最重要和应用最广泛的传动型式之一。在一定程度上说, 齿轮生产的技术水平, 关系着国家机械工业的发展水平。随着近代工业的迅速发展, 齿轮技术也有了很大发展。尤其是近 30 年以来, 在齿轮的啮合理论、承载能力计算与试验、材料和热处理、加工工艺、精度和测量、振动与噪声、润滑剂与润滑装置、新型齿轮传动等各方面, 均有很大的进展。通过以下情况概要说明齿轮技术的现状^{[45][46]}①。在齿轮的性能方面: 目前齿轮传动所能传递的功率可达 125000kW; 圆周速度可达 300m/s; 转速可达 10^5 r/min; 齿轮减速器的传动比可达 38851677; 效率可达 0.995; 齿轮箱内的温度可达 538°C; 重载齿轮的寿命可达 30 年以上。在齿轮的尺寸方面: 分度圆直径可从不到 1mm 至几十米, 例如美国制造的雷达天线驱动齿轮 $d=33$ m, 甚至在美国还出现过直径达 152.3m 的巨型齿轮; 齿轮的模数从 0.004mm 直至 100mm; 齿轮的齿数从特殊齿轮的齿数为 1 或 2 直至可达数千齿。在齿轮的制造及精度方面: 磨齿机的加工精度可达 ISO2~3 级; 滚齿机的加工精度可达 ISO5 级, 超高精度滚齿机的加工精度可达 ISO4 级; 经珩磨加工的齿轮的齿面粗糙度可达 $R_a=0.2\sim0.1\mu\text{m}$; 大型滚齿机的最大加工直径可达 9m; 由于高硬度及超高硬度滚刀的出现, 不仅 HB=300~400 的中硬齿面齿轮可以用滚齿机加工, 而且 HRC=56~62 的硬齿面齿轮也可以滚刮加工。

由于近代科学技术及工业的迅速发展, 对齿轮传动提出了越来越高的要求, 这些要求主要是高承载能力、高性能、高可靠性、体积小、重量轻。为了实现这些要求, 从 60 年代以来, 很多工业发达的国家在发展硬齿面、磨齿、高精度、修形齿轮方面取得了重大的成果。此外, 各种行星传动及圆弧齿轮等新型传动也得到了越来越广泛的应用。

在我国, 根据郑州机械研究所对高速重载齿轮行业 14 个主要生产厂的调查和对国内 84 位齿轮专家预测的统计^②表明, 我国当前齿轮技术科研攻关的主要方向是: 齿轮的热处理技术; 高速大功率齿轮热弹变形的测量及修形技术的研究; 齿轮装置的噪声控制技术的研究; 电子计算机在齿轮技术中的应用研究; 润滑油及润滑方法的研究; 齿轮材料的筛选; 提高齿轮加工精度的研究; 高效经济的淬硬齿轮精加工工艺的研究; 齿轮的损伤分析和损伤预报。

随着我国四化建设的迅速发展, 我国齿轮技术的发展必将进入一个新阶段。

① 钱振选, 2000 年我国的齿轮传动工程, 中国机械工程学会机械设计与传动学会齿轮专业委员会, 1984。

② 郑州机械研究所齿轮行业技术发展室, 齿轮行业“七五”及后十年技术发展预测总结报告, 1984。

0-2 齿轮承载能力计算准则和计算方法的进展

齿轮轮齿损伤的主要形式有：断齿、点蚀、胶合、磨损和塑性变形等。针对以上的损伤形式，到目前为止已经提出了如下的计算准则。

(1) 接触强度计算 为防止齿面点蚀和剥落，需进行齿面接触疲劳强度计算；为防止齿面塑性变形和压溃，需进行齿面接触静强度计算。

(2) 弯曲强度计算 为防止轮齿弯曲疲劳折断，需进行弯曲疲劳强度计算；为防止轮齿塑性变形和脆性折断，需进行弯曲静强度计算。

(3) 胶合计算 为防止齿面发生胶合破坏，需进行胶合计算或弹性流体动压润滑计算。

(4) 磨损计算 为防止齿面发生过度磨损，需进行齿面磨损计算，即计算齿面的线性磨损量，或按许用的线性磨损量计算齿轮的寿命。

以上四种计算准则，可用图 0-1 的失效区域图^[209]大致表示。失效区域图表示了点蚀、磨损、胶合和断齿四种失效形式对齿轮承载能力的限制关系。失效区域图指出了在相应的载荷和圆周速度范围条件下失效形式的范围。应该指出，失效区域图随具体工作条件和齿轮本身的情况而异，所以它不能直接用于设计和判断轮齿的工作能力。但它能表明失效的出现条件和彼此的关系。

从失效区域图 0-1a 可以看出，在齿轮的圆周速度不太高时，限制渐开线闭式调质钢齿轮承载能力的主要失效形式是点蚀；从图 0-1b 可以看出，在齿轮的圆周速度不太高时，限制渐开线闭式表面硬化钢齿轮承载能力的主要失效形式是轮齿折断。从图 0-1a、b 可以看出，对高速齿轮限制齿面承载能力的主要失效形式往往可能是胶合。对速度很低（如 $v < 0.5\text{m/s}$ ）的润滑齿轮，由于运转速度很低，润滑油膜可能变得极薄而被轮齿表面的微凸体尖点破坏，从而出现边界润滑情况，所以往往是磨损限制了齿轮的使用寿命和承载能力^[58]。低速磨损使齿轮由于齿形的严重损伤或轮齿折断而导致报废。

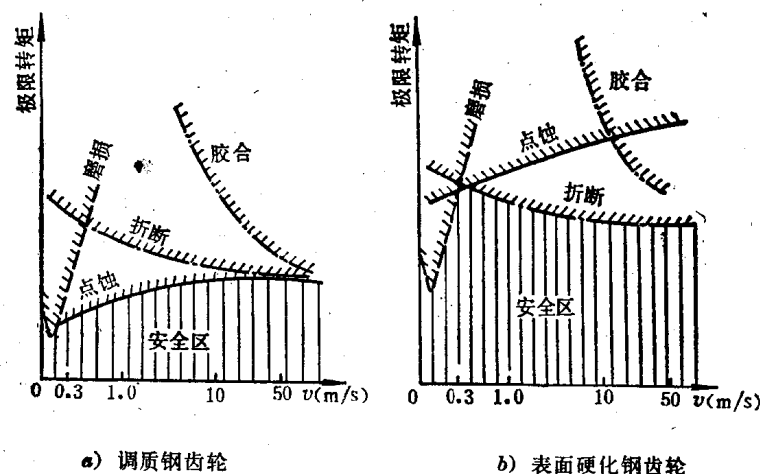


图 0-1 失效区域图的两个例子

对于开式齿轮，限制齿轮承载能力的失效形式主要是磨损和磨损后的轮齿弯曲折断。