



齿轮设计
丛书

CHILUN SHEJI
CONGSHU

小模数精密齿轮
传动设计

孙麟治 张鄂 赵明晶 邹桂根 编著

本书系齿轮设计丛书之一，主要阐述了小模数精密齿轮传动的设计原理和方法。内容包括：齿轮标准；齿轮几何尺寸计算；传动装置的系统 and 结构设计；传动链的精度、力矩、固有频率与振型的分析计算；回差与传动误差的控制；传动装置的性能测试以及相应的计算实例等。

本书可供从事精密机械和精密仪器设计的工程技术人员使用，也可供大专院校师生参考。

小模数精密齿轮传动设计

孙麟治 张鄂 赵明晶 邹桂根 编著

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业登记证出字第1117号)

重庆印制一厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

开本 787×1092 1/32 · 印张18¹/₈ · 字数398千字

1985年8月重庆第一版·1985年8月重庆第一次印刷

印数 0,001—7,800 定价 3.40 元

*

统一书号：15033·5624

齿轮设计丛书 出版说明

齿轮是应用非常广泛的重要传动元件。随着科学技术的飞跃发展，对齿轮传动提出了越来越高的要求。为适应形势的需要，总结、介绍国内外先进经验与技术，特决定组织出版这套《齿轮设计丛书》，以利提高我国齿轮设计、生产水平。

本书内容包括：齿轮啮合原理、齿轮传动的精度、各类齿轮传动（包括特种齿轮）和各类蜗杆传动的设计、齿轮的试验技术与设备等等。内容着重于介绍设计的理论基础、设计方法、设计参数以及数据的分析选择等，力图满足齿轮传动设计者的需要。因此，本书主要供从事齿轮设计、制造工作的工程技术人员参考。丛书将分若干分册陆续出版。

由于水平有限，书中难免有错误和不妥之处，欢迎读者批评指正。

前 言

小模数精密齿轮传动已广泛应用于航空航海仪器、自动控制装置、计量测试仪器、光学仪器以及雷达等精密机械和精密仪器中。近年来，随着国民经济和尖端技术的飞速发展，对齿轮传动的设计提出了许多特殊的要求，特别是对伺服系统中的小模数齿轮传动，不仅要满足一般精密机械的设计要求，而且要满足伺服系统的精度和性能要求。但是，以往这方面的文献资料比较分散并缺乏系统性。为此，我们编写了《小模数精密齿轮传动设计》一书以应目前的需要。

在编写内容上，本书力求结合当前我国精密齿轮传动实践和反映这一领域内的现代设计水平。

全书共分十章。第一、二、三、五、六章为基础理论，介绍了齿轮设计计算的基本公式；小模数齿轮新旧国标对比，齿轮传动装置的结构设计和精度分析的概率统计基础等。其它各章阐述了小模数齿轮伺服传动装置的系统设计；传动链的传动精度分析及其概率统计计算；传动链摩擦力矩、固有频率与振型的计算；回差与传动误差的控制技术等。

此外，本书还介绍了精密齿轮传动装置的一些先进的性能测试技术。这是保证精密传动装置获得高精度性能的必要措施和手段。

本书由孙麟治主编，由高忠华和龚振邦两同志审阅，龚振邦同志还增补了第八章第二节。在审阅中，他们对本书提

出了许多宝贵的意见，编者在此表示衷心的感谢。

由于作者水平所限，谬误之处在所难免，诚恳希望读者批评指正。

1982年

（此处为极淡的印刷文字，内容难以辨识，疑似为出版说明或前言的正文部分）

齿 轮 符 号

a	中心距	h_f	齿根高
a''	双面啮合中心距	i	传动比
b_1	小轮齿宽	j	侧隙
b_2	大轮齿宽	j_n	齿轮副的法向侧隙
c	顶隙	j_r	齿轮副的径向侧隙
c^*	顶隙系数	j_t	齿轮副圆周侧隙
d	直径, 分度圆直径	j'_t	齿轮圆周侧隙
d'	节圆直径	k	跨越齿数
d_a	齿顶圆直径	l	蜗杆导程
d_b	基圆直径	m	模数
d_f	齿根圆直径	m_i	小端模数
d_1	小轮分度圆直径, 蜗杆 分度圆直径	m_m	中点模数
d_2	大轮分度圆直径, 蜗轮 分度圆直径	m_n	法向模数
d_p	量柱(线)直径	m_e	端面模数
e	槽宽, 分度圆槽宽, 偏 心距	M	量柱测量距
h	齿高, 全齿高	m_x	轴向模数
h^*	齿高系数	n	转数
h_a	齿顶高	P	径节
h_a^*	齿顶高系数	p	齿距, 分度圆齿距
\bar{h}_a	弦齿高	p_b	基圆齿距
\bar{h}_c	固定弦齿高	p_n	法向分度圆齿距
		p_e	端面分度圆齿距
		p_x	轴向分度圆齿距
		q	蜗杆直径系数

R	锥距, 外锥距	α_a	顶圆压力角
r	半径, 分度圆半径	α_n	法向压力角
r_a	齿顶圆半径	α_t	端面压力角
r_b	基圆半径	α'_t	端面啮合角
r_f	齿根圆半径	$\text{inv}\alpha$	渐开线函数
r_y	任意圆半径	α_y	任意点 y 的压力角
s	齿厚, 分度圆齿厚	β	螺旋角, 分度圆螺旋角
s_b	基圆齿厚	β_b	基圆螺旋角
s_n	法向齿厚, 蜗杆分度圆 柱法向齿厚	γ	导程角, 分度圆导程角
s_t	端面齿厚	δ	分锥角, 蜗轮中心包角
s_x	蜗杆分度圆柱轴向齿厚	δ'	节锥角
s_y	任意圆齿厚	δ_a	顶锥角
\bar{s}	弦齿厚, 分度圆弦齿厚	δ_f	根锥角
\bar{s}_c	固定弦齿厚	e	重合度
v	线速度	θ_a	齿顶角
W	公法线长度	θ_f	齿根角
W_k	跨 k 齿测量的公法线长 度	λ	蜗杆螺旋升角
x	变位系数	ρ	曲率半径
x_1	小轮变位系数	ψ	齿厚半角
x_2	大轮变位系数	ω, Ω	角速度,
y	中心距变动系数	φ	转角
z	齿数	ϵ	角加速度
z_1	小轮齿数, 蜗杆齿数	η	效率
z_2	大轮齿数, 蜗轮齿数	Δ	误差
z_v	当量齿数	Σ	轴交角, 交错角
α	压力角, 分度圆压力 角, 齿形角	$\Delta F_t'$	切向综合误差
α'	啮合角,	F_t'	切向综合公差
		$\Delta F_r''$	径向综合误差
		F_r''	径向综合公差
		$\Delta f_t'$	切向相邻齿综合误差

f_i	切向相邻齿综合公差	Δf_x	x 方向轴线的不平行度
Δf_i^H	径向相邻齿综合误差	Δf_y	y 方向轴线的不平行度
f_i^H	径向相邻齿综合公差	f_x	x 方向轴线不平行度的公差
ΔF_P	周节累积误差	f_y	y 方向轴线不平行度的公差
F_P	周节累积公差	ΔE_M	量柱测量距偏差
Δf_{Pi}	周节偏差	E_{Ms}	量柱测量距上偏差
f_{Pi}	周节极限偏差	E_{Mi}	量柱测量距下偏差
Δf_{Pb}	基节偏差	$\Delta E_a'$	双啮中心距偏差
f_{Pb}	基节极限偏差	E_a''	双啮中心距极限偏差
ΔF_r	齿圈径向跳动	E_r	进刀误差
F_r	齿圈径向跳动公差	E_{rs}	进刀上偏差
Δf_i	齿形误差	E_{ri}	进刀下偏差
f_i	齿形公差	E_i	齿轮副综合传动误差线值量
ΔF_β	齿向误差	E_φ	齿轮副综合传动误差转角量
F_β	齿向公差	E_ϕ	传动链综合传动误差
ΔF_w	公法线长度变动量	F_t	齿轮副(单向)传动误差线值量
F_w	公法线长度变动量的公差	F_φ	齿轮副(单向)传动误差转角量
E_w	公法线平均长度极限偏差	F_ϕ	传动链(单向)传动误差
E_{ws}	公法线平均长度上偏差	j_t	齿轮副侧隙
E_{wi}	公法线平均长度下偏差	j_φ	齿轮副回差转角量
ΔE_w	公法线平均长度偏差	j_ϕ	传动链回差
ΔE_s	齿厚偏差		
E_s	齿厚极限偏差		
E_{ss}	齿厚上偏差		
E_{si}	齿厚下偏差		
Δf_a	中心距偏差		
f_a	中心距极限偏差		

目 录

第一章	绪论	1
第二章	小模数齿轮标准	8
第一节	小模数齿轮的基准齿形	8
第二节	齿轮模数国家标准	14
第三节	小模数齿轮精度标准	15
第三章	小模数齿轮传动的几何尺寸计算	69
第一节	渐开线标准齿轮各部分名称及其基本尺寸	69
第二节	直齿圆柱齿轮传动的几何尺寸计算	72
第三节	变位齿轮及其传动的几何尺寸计算	73
第四节	斜齿圆柱齿轮传动的几何尺寸计算	80
第五节	螺旋齿轮传动及其几何尺寸计算	84
第六节	直齿圆锥齿轮传动及其几何尺寸计算	89
第七节	蜗轮蜗杆传动及其几何尺寸计算	94
第八节	渐开线齿轮的齿厚计算	99
第四章	小模数齿轮传动装置的系统设计	149
第一节	小模数齿轮传动的结构因素对伺服系统性能的影响	149
第二节	传动链的级数和各级传动比的选择	172
第三节	齿轮传动型式的选择及其在传动链内的最佳安排	185
第四节	模数和齿数的确定原则	192
第五节	小模数齿轮精度等级和侧隙类型的选择	194
第五章	小模数齿轮传动装置的结构设计	203
第一节	齿轮的结构设计	203
第二节	齿轮与轴的联接	210
第三节	齿轮的支承	218

第四节	齿轮箱体的设计	228
第五节	联轴节与离合器	232
第六节	齿轮材料与热处理	249
第六章	小模数齿轮传动链精度分析的 概率统计基础	252
第一节	基本概念	252
第二节	随机变量及其分布规律	254
第三节	随机变量的合成及其函数的分布	271
第四节	齿轮传动链精度参数的典型分布	277
第七章	小模数齿轮传动链的精度分析与计算	290
第一节	传动链的回差计算	291
第二节	传动链的单向传动误差计算	358
第三节	传动链的综合传动误差计算	375
第八章	小模数精密齿轮传动链力矩、固有频率与 振型的计算	386
第一节	传动链的力矩计算	386
第二节	传动链固有频率与振型的计算	424
第九章	回差与传动误差的控制	458
第一节	回差的控制	458
第二节	传动误差的控制	486
第十章	传动装置的性能测试	492
第一节	传动误差的测量	492
第二节	回差的测量	535
第三节	刚度的测量	550
第四节	摩擦力矩的测量	551
参考文献	564

第一章 绪 论

齿轮传动是一种最为常见的机械传动型式，它是利用轮齿的相互啮合来传递运动和动力的。

齿轮传动有着悠久的历史，它的应用范围非常广泛，因而导致建立了庞大的齿轮制造业。近年来，虽然由于新技术的发展，例如电子设备、低速力矩电机和液压马达的发展，在某些具体场合下可以代替齿轮的作用，但从整个齿轮的应用领域，以及近些年来齿轮产量来看，仍然在继续发展，并保持着它的重要地位。

齿轮传动所以能够获得如此广泛的应用，是由于与其它机械传动相比时，在设计和制造合理的前提下，它具有传动精度高、传动平稳、适用范围广、传动效率高、结构较紧凑、工作可靠、寿命较长和成本较低等特点。

根据齿轮传动的用途，可以分为四大类：

(1) 动力齿轮传动 这类齿轮传递很大的力矩，其功率以几十或几百 kW 计，应用于汽车、拖拉机、冶金机械、矿山机械、涡轮机、空气压缩机以及船用机械等。目前世界上最大的船用动力齿轮传动装置的额定功率高达 50,000HP，大齿轮分度圆直径达 5m，齿轮的模数很大，有的达到 20mm。这种齿轮传动的精度要求并不很高。设计中主要考虑的是功率的传递，即是强度和效率等问题。

(2) 机床齿轮传动 这类齿轮传动随着机床制造业的发展，已经形成一个比较独立的分支。它所传递的力矩中

等，一般为几kW到几十kW，它的模数也为中等，但对齿轮的平稳性指标和接触精度指标要求较高，以满足降低机床噪声、振动以及运转平稳等性能要求。

(3) 通用齿轮传动 这类齿轮传动系指许多用于小型工业设备、家用机械设备以及手动工具等普通机械产品中的齿轮，品种繁多，模数和齿轮尺寸中等，既无精度要求，也无很高的功率和强度要求。

(4) 精密齿轮传动 这是近年来发展起来的另一特殊分支，主要用于精密机械和仪器领域，诸如航空和航海精密仪器仪表、自动控制装置、计量测试仪器以及精密雷达和光学仪器等。特别是小功率伺服系统中的小模数齿轮传动，它不仅包含了一般精密机械零部件设计计算的内容，而且与伺服系统的精度和性能有着密切的联系。例如，图1-1是一台光学电影经纬仪俯仰角跟踪传动系统的传动原理示意图。仪器采用闭环伺服系统，用于对飞行目标的轨迹进行跟踪测量。图1-2为其传动系统的方框图。这是一台包括光学、精密机械和电子技术的近代光学测量仪器，具有自动跟踪控制和半自动人工控制两种工作方式，即是用外部信号控制或用手轮操纵。外部控制是指仪器可以利用跟踪雷达或预定函数发生器的信号进行遥控。半自动人工控制是指通过操纵员转动手轮，使伺服电动机带动仪器，并按照瞄准望远镜对准目标观察到的差角进行跟踪。系统中的半自动控制齿轮箱G1由手轮4带动，用于驱动电位器和电动机组，实现人工修正瞄准镜中的标线相对于目标的脱靶量。驱动齿轮箱G2由伺服电动机M驱动，是为伺服系统的执行部件。驱动齿轮箱G2的输出端，通过联轴节5和6与经纬仪俯仰轴上的齿轮传动装置G3连接，带动仪器的负载—主望远镜对准目标进行精密

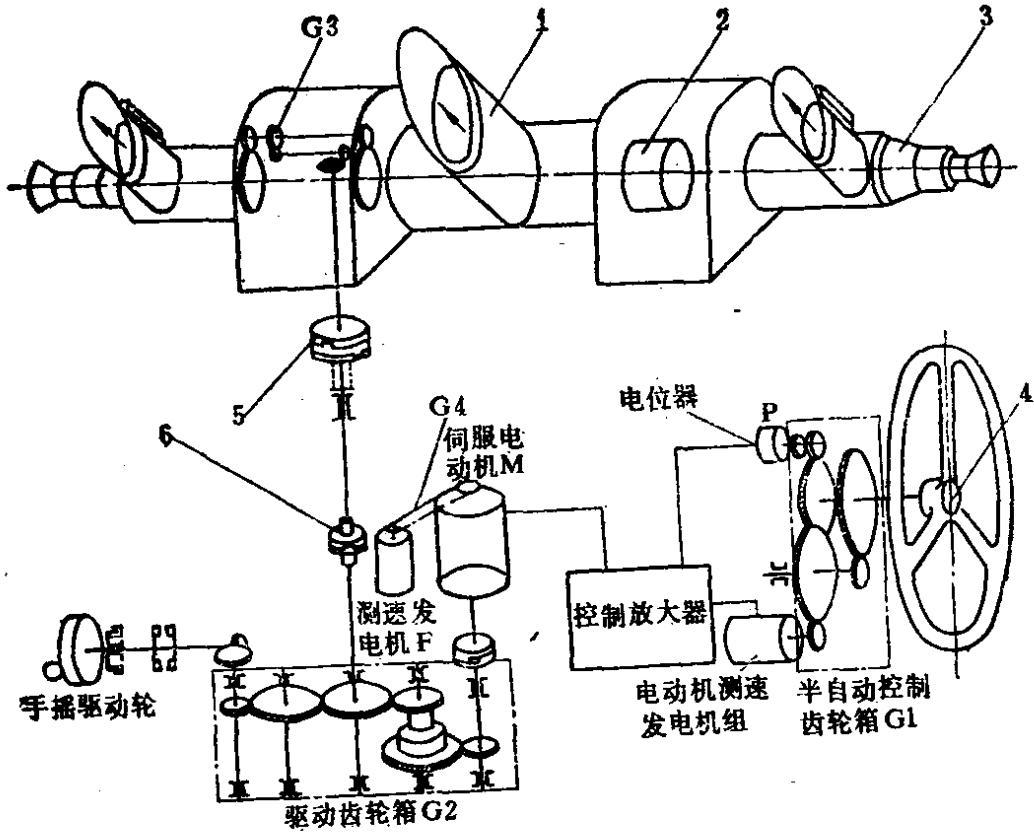


图1-1 光学电影经纬仪传动系统

1—主望远镜 2—测角元件 3—瞄准望远镜 4—手轮 5、6—联轴节

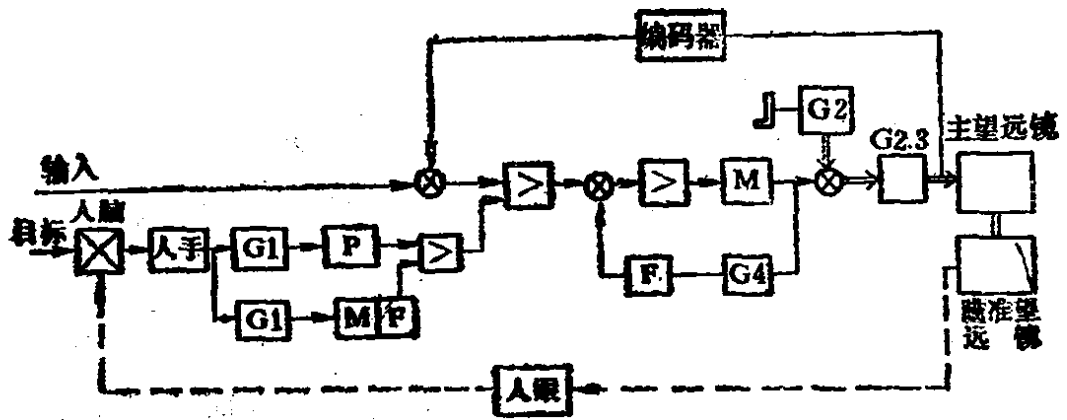


图1-2 电影经纬仪伺服系统方框图

跟踪。仪器的俯仰轴上装有测角元件组成的伺服系统位置回路。齿轮箱G4装在速度反馈回路内(图中用皮带传动代替)。在此俯仰轴传动链内,自伺服电动机至负载的总传动比 $i=800$,全部采用 $m=1$ 精密齿轮,半自动控制齿轮箱内全部采用 $m=0.5$ 齿轮。伺服电动机的额定功率为160W。

图1-3所示为某雷达天线数据传递系统的伺服齿轮箱,这是一种典型结构,其上装有伺服电动机、电位器和粗精同步机。传动链均采用小模数齿轮^[31]。

由此可见,这类精密齿轮传动通常传递的力矩不大,功率很小,主要用来传递运动或变换运动方向、指示读数、调整机构的位置等。对于这类齿轮传动,在设计中主要涉及的具体要求有:

(1) 传动精度 这是指齿轮传动链在单向传动时,瞬时传动比保持理论值的精确程度。影响齿轮传动精度的因素,主要是传动装置中的齿轮、轴、轴承、联轴节等的制造装配误差。对用于分度、示数及测量系统的传动,由于其传动精度直接影响装置的精度,因而对其传动精度要求较高。

精密机械和仪器用的齿轮,一般来说,它所要求的齿轮精度比一般机械传动高。在一般机械中,7级精度已经足够的了,但在精密齿轮传动中不仅普遍采用7~8级齿轮,有时必须选择5~6级精度齿轮,甚至3~4级超高精度的齿轮才能满足要求。

(2) 回差 这是指主动齿轮固定时,由于齿轮、轴、轴承、联轴节等零部件的间隙和弹性变形等,使从动轮可能产生的空程转角。如果传动链在工作中,需要经常改变运动方向,并有加速、减速运动的性能要求,则应适当控制和减小齿轮传动的回差。对于伺服系统中的齿轮传动装置或机

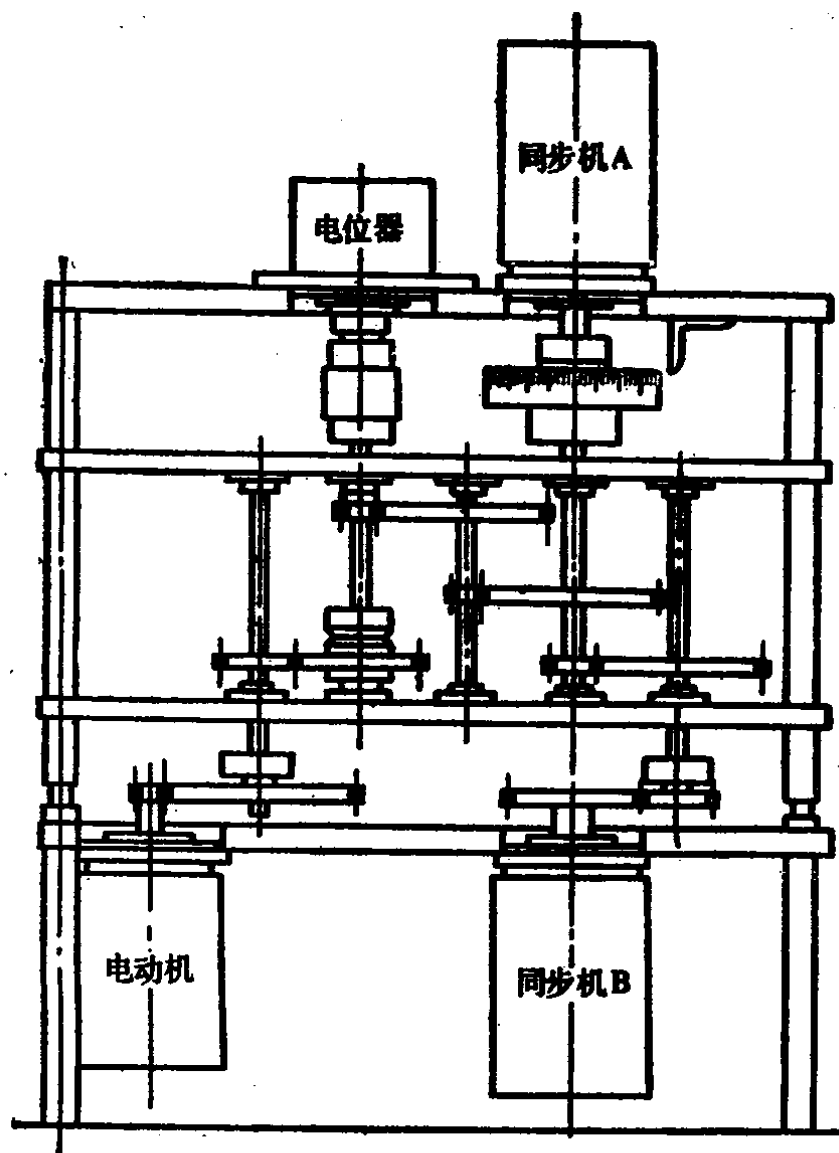


图1-3 伺服齿轮箱

构，传动链内的回差将直接影响伺服精度和系统的稳定性，必须严格控制。

(3) 传动效率 齿轮传动的效率将影响电动机功率的选择，并且，过大的摩擦力矩会降低伺服系统平滑变速的范围，甚至引起低速爬行现象。

对小模数齿轮传动的效率要求，虽然不及对动力齿轮传动重要，但是，毕竟小功率传动系统电动机的功率有限（一

般是几分之一至几十W),有时效率问题也很突出。

(4) 传动链的转动惯量 对于小功率伺服系统中的齿轮传动,减小转动惯量,可以提高系统工作的灵敏度。可以提高机械结构的固有频率。

(5) 传动链的刚度和固有频率 齿轮传动链的刚度是指单位扭转力矩作用下的变形程度。机械结构的固有频率与刚度成正比。特别在伺服系统中,机械结构的固有频率经常成为限制伺服性能的一项指标,系统的带宽越宽,对传动链的固有频率要求也越高。

(6) 传动平稳性 对于高速齿轮传动,提高齿轮传动的平稳性,可以减小振动和噪声。对于有精密跟踪和瞄准精度要求的伺服系统,传动的平稳性将直接影响仪器的低速跟踪性能。

(7) 结构简单紧凑 对精密仪器来说,尺寸小、重量轻往往十分重要。因此,在满足基本要求的前提下,应力求减小齿轮传动装置的尺寸和重量。

精密机械和仪器中常用的齿轮传动型式为圆柱齿轮(直齿和斜齿)传动、螺旋齿轮传动、圆锥齿轮传动、齿条传动和蜗轮蜗杆传动等。在精密机械和仪器制造中较多采用直齿圆柱齿轮,这是因为直齿圆柱齿轮的设计和制造都比较方便,并且其传动精度和效率也较高。

但是,近年来有不少的精密机械和仪器产品,对机械传动提出的要求愈来愈高。不仅要求体积小、重量轻、传动比大、而且还要求传递力矩的能力高,摩擦损失少以及回差小等。为了适应这种趋势,一些新的内啮合行星齿轮传动型式,如渐开线少齿差行星齿轮传动与谐波齿轮传动等在国内外得到了普遍重视,并已得到应用。

以上这些传动型式从原理来讲,通常与一般机械中用的齿轮传动并无根本区别,但是在精密机械与仪器中,经常采用模数1.5mm以下的小模数齿轮(有的场合也采用 $m < 3\text{mm}$ 的中模数齿轮,西德齿轮标准统称为精密工程用的齿轮传动),从而具有模数小、精度要求高等特点。因此,在设计中应当根据精密机械和仪器的具体工作条件和要求,合理地选择齿轮传动型式,妥善安排传动装置的设计。

本书将针对这类小模数精密齿轮传动的特点,从上述各个方面的要求出发,讨论小模数齿轮本身的设计计算方法,并介绍整个传动系统的设计要点;回差与传动误差的分析、计算和其控制;摩擦力矩的分析与计算;传动系统固有频率的计算;以及传动装置的装配和性能测试技术等问题,为读者提供经济合理的设计方法,以求设计出良好性能的传动装置。