

〔日〕近畿齿轮恳话会 会田俊夫 主编

齿轮的设计和制造

第一卷

圆柱齿轮 的设计

中国农业机械出版社

圆柱齿轮的设计

《齿轮的设计和制造》第一卷

〔日〕近畿齿轮恳话会

会田俊夫 主编

金公望 译

中国农业机械出版社

内 容 简 介

本书是日本出版的《齿轮的设计和制造》共四卷中的第一卷译本。其余三卷依次是《圆柱齿轮的制造》、《圆锥齿轮与蜗轮》及《齿轮的精度与性能》，这三卷译本仍将由中国农业机械出版社陆续出版。

本书首先介绍齿轮发展的概貌，包括历史、技术现状及分类等。然后着重说明圆柱齿轮的齿形设计（直齿轮、斜齿轮等）和强度设计（弯曲强度、齿面强度、胶合强度等），并且给出圆柱齿轮的主要尺寸计算值。全书计算公式和实用图表较多。

本书可供有关的研究人员、工程技术人员、生产工人及大专院校师生阅读。

円筒歯車の設計

歯車の設計・製作①

近畿歯車懇話会編

會田俊夫監修

大河出版社，1976年2版発行

★ ★ ★

圆柱齿轮的设计

《齿轮的设计和制造》第一卷

〔日〕近畿齿轮恳话会

会田俊夫 主编

金公望 译

*

中国农业机械出版社出版

北京市海淀区阜成路东钓鱼台乙七号

北京市大白楼印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

新华书店经售

*

850×1168 32开 8 1/2印张 221千字

1983年4月北京第一版·1983年4月北京第一次印刷

印数：00,001—13,500 定价：0.96元

统一书号：15216·136

前 言

在机械工业的进步和发展的推动下，构成机械工业的很多要素中的每个要素都必须是进步的可靠的要素。只要使用齿轮，完成齿轮技术的技术，其必要性就越来成为重大的课题。例如，某齿轮装置作为某一个最新机械装置的一部分，要求该齿轮装置具有更大的承载能力，若不确定齿轮强度的设计方法和制造方法则难奏效。为此，必需对齿轮进行更精深的研究，并确立在此研究基础上的技术。至少机械技术人员应该认识到：确保朴实无华的基础齿轮技术，其重要性并不亚于掌握艳丽多采的新技术。

基于以上认识，作者决心逐步奉献出《齿轮的设计和制造》一书，为确立齿轮技术略效微力。

本书是作为日本近畿齿轮恳话会成立二十周年纪念活动之一而计划、出版的。近畿齿轮恳话会成立于1949年2月，其目的是通过齿轮制造者、使用者、研究者的三结合来提高日本齿轮技术，自成立以来，通过每月的研究会，作出了很多成绩，如普及齿轮知识、拟订 JIS 齿轮制图、精度测定方法、检验用基准齿轮标准草案等方面，但积累二十年的经历深感需要一本书——与提高齿轮技术人员的技术水平紧密相结合的堪称座右之书的齿轮技术书籍。

日本在齿轮研究方面，从三十年代初就陆续有研究成果发表，从四十年代开始研究活跃，很多研究人员、技术人员发表了很多论文，目前有不少优秀而实用的论文，可以说已达到世界先进水平。但是，就齿轮技术最近取得的显著成就作综合的评价，尚比欧美先进国家稍逊一筹，这亦是不应讳言的。其原因之一据认为就是引进优秀研究成果最终变成优秀的实用技术所投下的力量稍嫌不足。为了克服这个困难，必须培养大批最有才华的齿轮

技术人员，为此，优秀的齿轮技术书籍可谓必不可少。

日本以前出版的齿轮技术书籍也不算少，其中出版过一些优秀的齿轮技术书籍。这些书中，有的是专论齿形理论和特殊切齿加工的，有的是篇幅庞大的专著或手册，但是对齿轮技术人员既浅显易懂而又涉及最新研究成果的齿轮技术书籍还不多见。

本书就是针对以上现状而计划编写的。但全面论述齿轮则篇幅太大，而且有重点不突出的问题，因此决定书的内容限于与齿轮技术人员直接有关的齿轮设计和制造，即使这样也可谓洋洋大观了。

在近畿齿轮恳话会成立二十周年的1969年以前，1968年2月就成立了本书的编委会，从本会会员中选了十七名在齿轮设计和制造部门工作的优秀技术人员和研究人员担任编委，召开了多次编委会讨论编写方针，对内容进行讨论后分头着手执笔。

本书最大的特点是：执笔者都是各部门实际经验丰富的专家，他们采取综合论述方式，即用简明实例来阐述问题又介绍最新研究成果和技术。由于首次采用这样的编写方式，难免出现全书不统一和重复论述的缺点，但在编写时对此倍加注意，不仅注意到论述方式、统一术语及内容均衡，还尽量做到不罗列而有重点。

本书虽然采用简明论述方式，具有高等工业学校毕业水平即可理解，但内容还是比较高深的，可以说反映了当前日本齿轮技术的水平，作者期待本书的广泛普及对提高日本齿轮技术有所裨益。

值此书出版之际，谨向积极赞同并大力协助的近畿齿轮恳话会各位干事和在百忙之中抽暇执笔的各位编委，特别是对负责整理原稿的岡本隆干事深表谢意。还要向赞同本计划并大力协助的大河出版社的三泽三郎先生和中村久元先生，特别是对为校正齿轮特有的复杂符号和图版而不辞劳苦的淡路保孝先生致以崇高的敬意。

主编 会田俊夫

1971年2月

目 录

第一章 齿轮概论	1
1.1 齿轮技术的发展和现状	1
1.1.1 齿轮的历史	1
1.1.2 齿轮技术现状	8
1.2 齿轮的分类	15
1.2.1 按齿轮轴线相互位置分类	19
1.2.2 按齿轮用途分类	37
1.3 齿轮的啮合	45
1.3.1 啮合的机构学必要条件	45
1.3.2 齿轮的齿形曲线	46
1.3.3 齿形的滑动比	64
第二章 圆柱齿轮的齿形设计	71
2.1 齿轮术语	71
2.2 渐开线齿轮的齿形	74
2.3 直齿轮的齿形设计	76
2.3.1 标准齿轮	76
2.3.2 变位齿轮	80
2.3.3 内齿轮	88
2.3.4 变位直齿轮的计算	93
2.3.5 变位内齿轮的计算	98
2.3.6 各种变位制	101
2.3.7 齿形修整和鼓形修整	108
2.4 斜齿轮的齿形设计	120
2.4.1 渐开线斜齿轮的齿形曲面	120
2.4.2 斜齿轮的啮合和齿形曲面	121
2.4.3 齿形曲面的几何学特性	121
2.4.4 斜齿轮的啮合参数	123

2.4.5 变位斜齿轮的计算	125
第三章 圆柱齿轮的强度设计	131
3.1 圆柱齿轮的弯曲强度	133
3.1.1 直齿轮的弯曲强度	133
3.1.2 斜齿轮的弯曲强度	149
3.1.3 齿形系数	155
3.1.4 载荷分布系数和斜齿系数	160
3.2 圆柱齿轮的齿面强度	165
3.2.1 直齿轮的齿面强度	165
3.2.2 斜齿轮的齿面强度	174
3.3 圆柱齿轮的胶合强度	178
3.3.1 胶合强度	179
3.3.2 胶合试验	186
3.4 齿轮各部分的尺寸	194
附录一 渐开线函数表	201
附录二 $B(\alpha)$, $B_p(\alpha)$ 函数表	231

第一章 齿轮概论

1.1 齿轮技术的发展和现状

1.1.1 齿轮的历史^{〔1〕}

很遗憾,不可能正确地说明齿轮的起源。大约在公元前2000年左右,带锯齿纹的轮状物就已开始用作陈设和装饰,或出现在陶壶彩绘、金属容器雕刻的图案中。其后出现了青铜铸造的齿轮状盘和轮,人类最初利用金属就开始有这些东西。但是还不能认为在该时该地这些就已具有作为齿轮的技术上的意愿,可能是用作象征眼睛或太阳的东西。因此可以认为,带齿的轮子在它具有某种技术上的意义以前,也就是说成为一门技术以前,就早已为人类所知。

不久,带齿的轮子从装饰品向具有技术意义的齿轮发展,据认为联结这个发展过程的是金属铸造和使用锉刀的能力。至晚在公元前400年,就已产生锉刀。

那么,具有技术意义的齿轮是什么时候产生的呢?希腊哲学家亚里士多德(Aristotle, 公元前384—322)在他所著《机械问题》中,提到楔、曲轴、滚子、车轮及滑轮,同时也提到传递旋转运动的青铜或铁制齿轮,据说这是留下了明确记录的关于齿轮的最早文献记载。当然,还不能据此而说亚里士多德发明了齿轮,但是可以说这些记载表明当时已在某种程度上使用了金属制造的齿轮。

那么,古人所用齿轮最初是什么样的形状呢?据认为其中之一大概就是图1-1所示的水车所用形状。

著名的希腊学者阿基米德(Archimedes, 公元前287—212)好象在齿轮方面也有相当的知识,特别是在亚里士多德未提到的

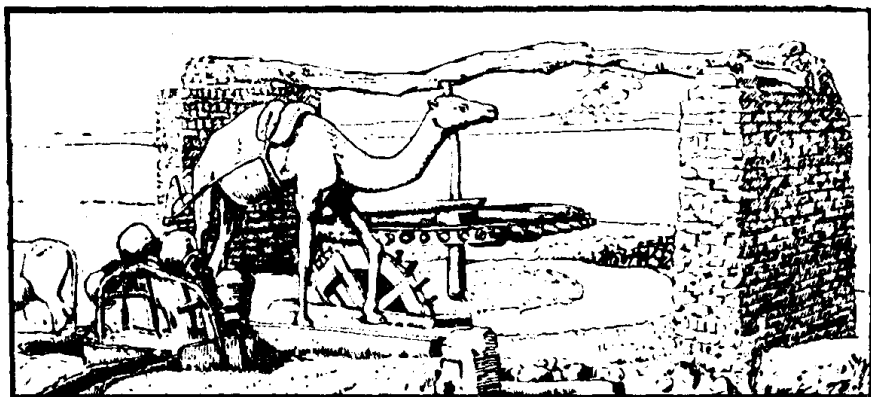


图1-1 埃及卢克索的提水齿轮装置

蜗杆传动方面，留下了应该特别予以记载的业绩。图1-2是阿基米德的蜗杆传动卷扬机。

还应该特别提到公元前一世纪左右的罗马建筑师维特鲁维亚斯（Vitruvius），在他的著作中已叙述图1-3所示装有齿轮装置的水力磨粉机，这是作出了具体记载的最早的动力传递用齿轮。

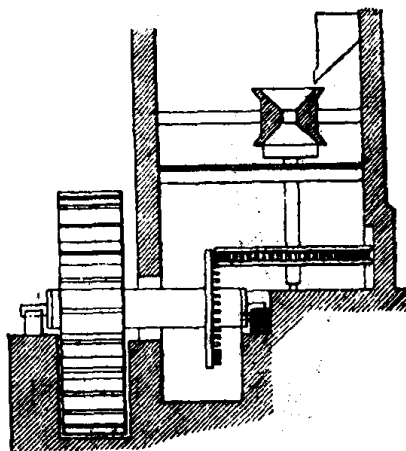
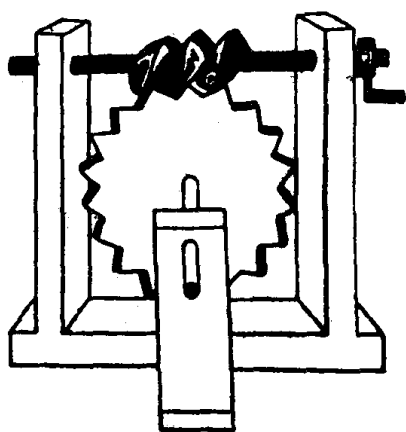


图1-2 阿基米德的蜗杆传动卷扬机 图1-3 维特鲁维亚斯的水力磨粉机

图1-1和图1-3的齿轮都是木制的，可以确认最初这些齿轮都是制车木工用手工制造的，车的历史远比齿轮的历史悠久，可以

追溯至公元前3000年。

还有一种观点和上述齿轮的创始和发展完全不同，该观点认为齿轮的创始和发展是和当时人类现实生活直接关联着进行的，早期的齿轮是传递运动机构的齿轮。若按开始所说齿轮是由装饰品发展而来的说法，也可推论传递运动的齿轮早于传递动力的齿轮。下面谈一下传递运动的齿轮。

据说公元前150年左右，亚历山大的克特西贝魏斯(Ctesibius)就将齿轮机构用于水力计时器。这是传递运动的齿轮装置，装有这类装置的机器还有亚历山大的赫伦(Heron)的计程车和瞄准器、图1-4所示维特鲁维亚斯的计程车等。

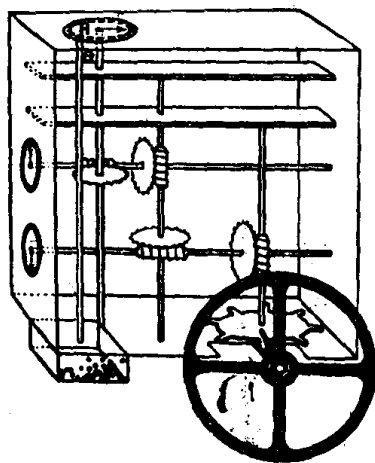


图1-4 维特鲁维亚斯的计程车

到了中世纪，齿轮和机械式钟表相结合，钟表齿轮越做越精巧，逐渐接近现代齿轮的形状。1484年德国纽伦堡的伯纳·瓦尔特鲁斯(Bernhard Waltherus)将机械式钟表用于天文观测，可以说这是装有齿轮的机械式钟表用于科学研究的最早记载。在此期间，传递动力的齿轮也随着水力、风力、畜力利用的发展而增加，出现了传递动力相当大的齿轮。

十五世纪后叶，利纳杜·达·芬奇(Leonardo da Vinci)在齿轮技术史上留下了应该大书特书的成果。图1-5是达·芬奇手稿中的各种齿轮装置，值得注意的是图1-5c中的圆锥齿轮、图1-5d中左边的圆弧面蜗杆传动的雏形、图1-5f中右面的准双曲面齿轮传动(面齿轮)的雏形及图1-5g中的侧面蜗杆传动的雏形等。可以说是利纳杜·达·芬奇奠定了齿轮作为机械零件的地位。

刚进入十七世纪后叶就已开始进行齿形理论研究，但是齿轮技术取得高速进展还是十八世纪的工业革命时候的事，随着以蒸

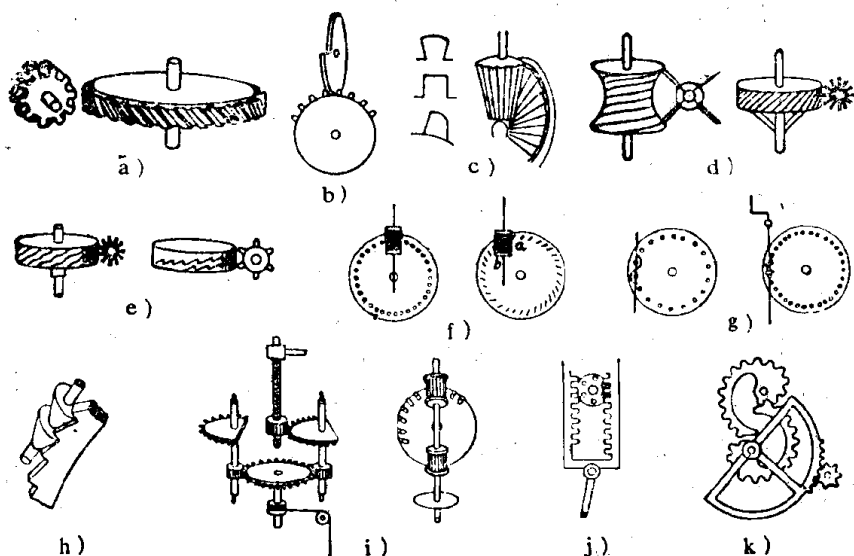


图1-5 利纳杜·达·芬奇手稿中的各种齿轮装置

汽机的发明为先驱的工业革命的来到，齿轮的使命就越重要，许多人进行了大量的有关齿轮的研究。以上发展过程若从齿形变迁的角度来描述则如图1-6所示。

齿形发展分四个阶段。

第一阶段是原始齿轮装置中所见的所谓挂引齿轮阶段。

第二阶段是使用等节距齿轮阶段。十八世纪以前，虽然没有理论上正确的齿形，但是已能凭经验制造出颇能正确传递旋转运动的齿轮。

第三阶段是开始进行齿形理论研究、使用摆线齿轮的阶段。丹麦天文学家俄勒夫·罗默(Olaf Roemer)在1674年首先提倡：为使齿轮进行等速运动，外摆线齿形的齿轮是适当的。1694年法国的菲力普·狄·拉·伊勒(Philipp de La Hire)发表了题为“外摆线理论”的演讲，提出外摆线齿形作为与点齿轮或针轮啮合进行等角速度运动齿轮的齿形。法国数学家卡谬斯(M. Camus)对钟表齿轮的齿

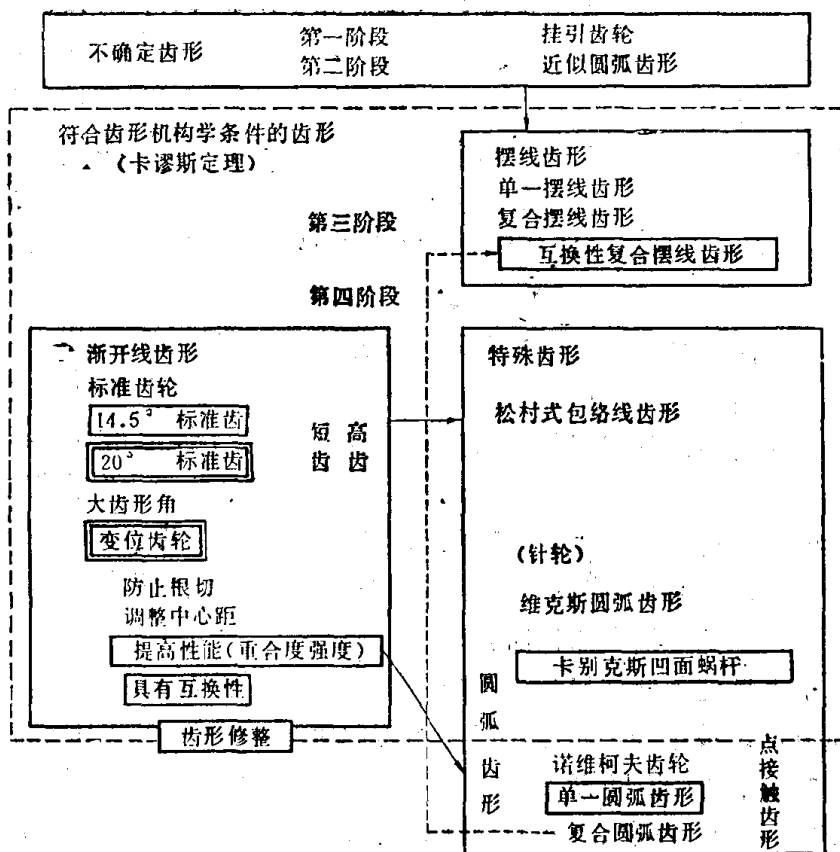


图1-6 齿形变迁

形进行了研究，在1733年发表了下述理论：如图1-7所示，轮齿接触点 B 的公法线 BC 应该恒通过两齿轮中心联线上定点 C (节点)。这就是所谓卡谬斯定理，至今仍是作为齿形机构学条件而众所周知的齿形啮合基本原则。十九世纪中叶，英国剑桥大学

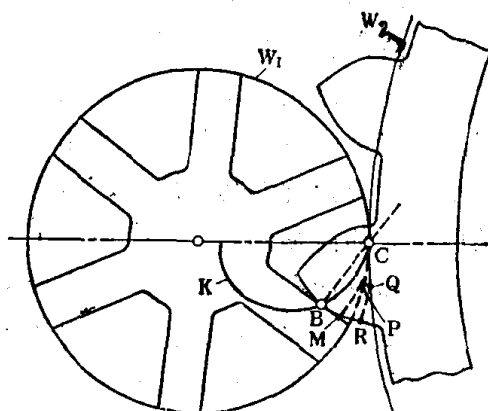


图1-7 用转动曲线 K 表示一对齿轮的啮合(取自卡谬斯)

罗伯特·威利斯(Robert Willis)教授发表了在节圆外侧和内侧分别采用外摆线和内摆线的复合摆线齿形,并进一步阐明了摆线滚动圆和齿数无关,不同齿数的齿轮,滚动圆直径恒取等值,因此采用这种齿形系的齿轮,不管齿数多少都能正确啮合,是具有互换性的齿轮。这样就完成了具有互换性的复合摆线齿形。不久,布朗·夏普公司出售根据这种齿形设计的成形铣刀,从而普及全世界。

第四阶段是渐开线齿形阶段。渐开线齿形在其创始阶段中处于劣势,普及很慢,由于利昂赫特·欧拉(Leonhard Euler)和其他先驱者逐渐阐明其优点,特别是威利斯选定了齿形角为 14.5° 的标准齿轮,其优越性才逐渐为人们所认识,但是取代当时占统治地位的摆线齿形而成为占优势的代表性齿形,还是进入二十世纪以后的事,当时由于范成切齿法的研究,才使渐开线齿形在实用中普及,从此才进入第四阶段。

十九世纪上叶就已出现范成法切齿机床,在范成法的主流滚齿机方面,最早的记录是1835年惠特沃思(J. Whitworth)的滚齿机专利。后经克里斯钦·希尔(Christian Schiele)和格兰特(G. B. Grant)改进。1900年赫曼·法乌特(Herman Pfauter)加上差动装置,首创了图1-8所示可以滚制斜齿轮的万能滚齿机,从此滚齿机滚制齿轮才走上普及的轨道。不久,范成法占了压倒优势,渐开线齿轮遍及全世界。

在渐开线齿轮普及的同时,渐开线齿轮的研究工作也在蓬勃开展,为了进一步提高性能,采用了很多方法。

增大齿形角就是其中之一,齿形角 20° 已标准化,有些齿轮还采用更大的齿形角。

在齿高方面有标准齿高、短齿及高齿,并已标准化。

进一步还研究了变位齿轮,提出了各种变位制并已实用化,这些变位制不仅是单纯地防止根切并改变中心距,而且改善了重合度和滑动比,也进一步改善了齿轮的强度特性。

最早实施变位齿轮方案的是拉希(O. Lasche 1899)。马克斯·

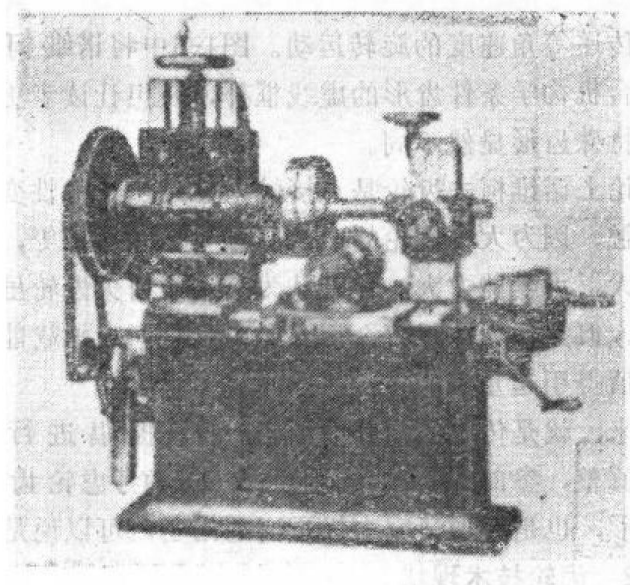


图1-8 法乌特公司的第一号滚齿机

马格(Max Mang)在1908年发表了马格齿轮。还发表过很多变位制,如库茨巴赫(K. Kutzbach)、弗里德里希(H. Friedrich)、欧尔里·白金汉(Earle Buckingham)、梅里特(E. H. Merrit)、福尔默(Fölmer)、希柏尔(Schiebel)、希尔西格(Hiersig)、中田孝等。现代还采用这样的变位制:在改善齿轮运转性能的同时,与标准齿轮一样,变位齿轮之间具有中心距互换性。

另一方面,很早以前,就已出现过脱离渐开线齿形来探求具有高性能的新齿形的齿轮的动向,松村式包络线齿形(1916)、维克斯圆弧齿形(参阅1.2节)等可以说就是这些新齿形的代表。但是这些所谓特殊齿形齿轮,只要稍微偏离理论要求的中心距就不能正确啮合,而且缺乏普遍性,制造上也有困难之处,因此除卡别克斯凹面蜗杆等特殊情况外,都停留在一时曾使用过而其后就少见于实用的状况。

最近引起广泛注意的诺维柯夫齿轮(参阅1.2节),其承载能力可达到渐开线齿轮的几倍。这是一种圆弧中心在节圆上的特殊圆弧齿形齿轮,与以前的特殊齿形有本质上的区别,它并不满足齿形机构学条件,从机构学观点来看是点啮合齿轮,采用斜齿

才能连续传递等角速度的旋转运动。图1-6中将诺维柯夫齿轮画在表示符合机构学条件齿形的虚线框外，是想让读者更容易理解它与其它特殊齿形显然不同。

在理论上诺维柯夫齿轮是点接触，但是由于弹性变形，实际上是面接触，因为大小齿轮的凹凸圆弧半径几乎相等，所以齿面接触面积大，承载能力大。作者认为：诺维柯夫齿轮虽然还要进一步完善，但是作为体现着今后方向应该是向高承载能力发展的齿轮，是值得引起重视的。

近年来，就是传统的渐开线齿轮，也在提倡进行齿形修整（或鼓形修整，参阅2.3.7）的重要性，这种考虑轮齿各种变形的修整齿形，也是齿形研究中极重要的问题，可以说是新技术。

1.1.2 齿轮技术现状

在这里拟按齿轮分类、尺寸、性能（承载能力和圆周速度）、精度和制造、齿轮设计方法等方面来大致叙述齿轮技术现状的概貌，其中的齿轮分类将在1.3节中详述，在此省略。

1. 齿轮尺寸

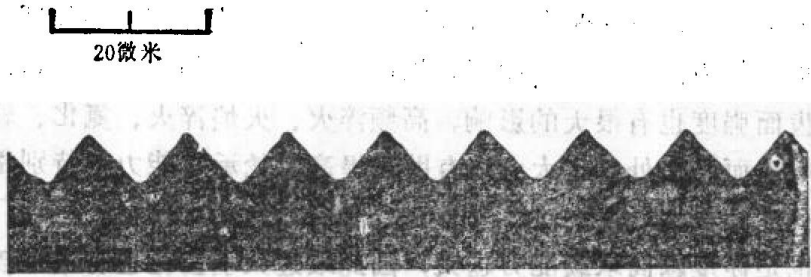
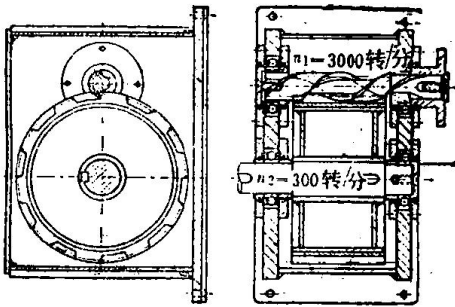
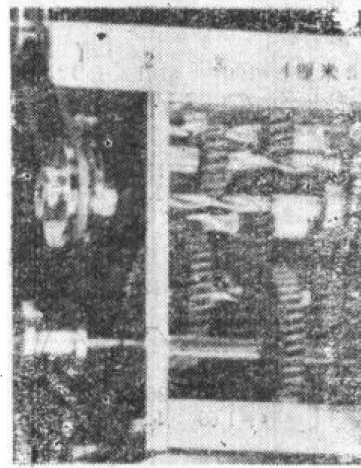
从模数、齿数、分度圆直径三方面来说明齿轮尺寸的现状。

在模数方面，JIS中只规定了 $m = 0.1 \sim 50$ ^①，实际使用中远远超出这个范围。在大的方面，产业机械中使用 $m = 50$ 的大型齿轮，甚至使用更大的 $m = 100$ 左右的巨型齿轮；在小的方面，图1-9所示大概就是小模数的极限，该齿轮为 $m = 0.004$ 、齿数 $z = 1500$ 、分度圆直径 $d_0 = 6$ 毫米，材料为铍青铜，在微型滚齿机上用金刚石滚齿刀滚齿^[2]，美国的费洛斯公司也试制过径节 $P = 401.256$ （ $m = 0.063$ ）的齿轮^[3]。

在齿数方面，曾制造过图1-10^[4]、图1-11^[2]所示齿数为1或2的特殊齿轮；齿数多的达数千齿。

在分度圆直径方面，曾制造过分度圆直径从一毫米至几十米的齿轮。最近在美国制造了 $d_0 = 33$ 米的雷达天线驱动齿轮^[5]，

① 原文为 $m = 0.1 \sim 25$ ，这是根据JIS B1701—1963而来的，JIS B1701—1973已将模数范围增至50。——译注

图1-9 $m = 0.004$ 的齿轮图1-10 $z=1$ 的驱动用减速齿轮装置图1-11 小齿轮齿数为2、总减速比
 $i = 17936605$ (6级)的齿轮装置

值得注意的是，尽管是由几个齿条用压力机弯曲成一定的曲率半径后组合而成，但是达到了所要求的高分度精度。美国还出现过直径500英尺(152.3米)的巨型齿轮。日本设置的大型滚齿机可以滚制最大直径为9米的齿轮。

2. 运转性能 (承载能力、圆周速度)

从齿形方面考虑提高承载能力，对渐开线齿轮而言，如图1-12^[6]和表1-1^[7]所示，是有限度的。最近研制的诺维柯夫齿轮等新型齿轮，据了解其齿面承载能力可达20°标准齿轮的三倍左右。

从材质和热处理方面考虑，现代合金钢渗碳淬火齿轮的承

载能力最高，进一步在其齿根圆角部分进行喷丸硬化等处理，可以提高轮齿的弯曲疲劳强度。最近的研究正在阐明，齿面粗糙度对齿面强度也有很大的影响。高频淬火、火焰淬火、氮化、软氮化等齿面硬化处理也大大地有助于提高齿轮承载能力，特别是正在研究的少变形淬火法^[3]。齿轮即使不进行齿面硬化处理，一般也是硬度越高承载能力越大，因此最近大型齿轮也有采用较高硬度的倾向，这就需要研究高硬度材料的切齿工艺，目前水平是硬度为 HRC43(HB400)的轮坯也可以进行切齿^[8]。

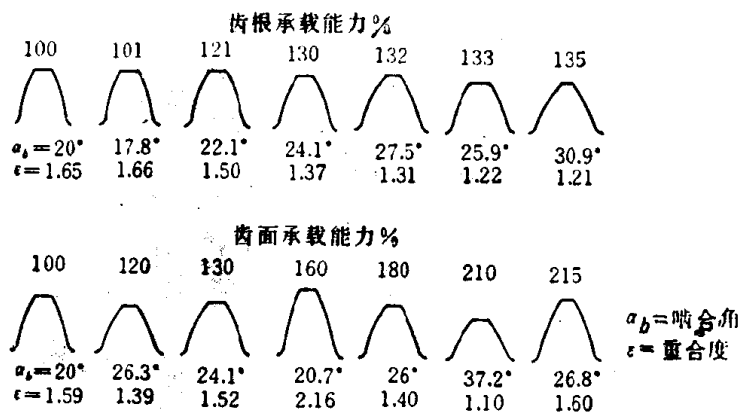


图1-12 齿形对承载能力的影响 (取自温特)

表1-1 各种齿形齿轮承载能力的比较 (取自尼曼)

齿 轮 种 类	承载能力 z_2/z_1	齿根强度 %		齿面强度 %	
		27/9	54/18	27/9	54/18 ^①
20°标准齿轮		100	100	100	100
05变位制齿轮		203	126	160	133
最大齿根强度变位齿轮		220	124	182	128
28°标准齿轮		153	112	168	129

① 原文为54/10，疑误。——译注

图1-13是温特(H. Winter)给出的图表，图中表示近百年来