

**Gear
Geometry
and Applied
Theory**

齿轮几何学与应用理论

[美] F.L. 李特文 (Litvin) 著
国楷 叶凌云 范琳 等译
国楷 校

上海科学技术出版社

齿轮几何学与应用理论

Gear Geometry and Applied Theory

[美] F. L. 李特文(Litvin) 著

国楷 叶凌云 范琳等 译

国楷 校

上海科学技术出版社

内 容 提 要

本书共 25 章。叙述各种型式齿轮的几何学及啮合原理,并阐明用计算机模拟和坐标系变换来使轮齿产形的理论。这样,可以达到齿轮加工的高精度和超高精度。此外,还扼要介绍齿轮传动在钟表、仪表、汽车和直升机等上的应用。

本书适宜于大学机械原理及机构学的教师和研究生阅读,也适宜于齿轮设计师和工程师进修学习。

图书在版编目 (C I P) 数据

齿轮几何学与应用理论 / (美) 李特文著; 国楷等译.
上海: 上海科学技术出版社, 2008.6
ISBN 978-7-5323-9420-3/TG · 171

I. 齿… II. ①李…②国… III. 齿轮-几何学 IV.
TH132.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 068263 号

上海世纪出版股份有限公司 出版、发行
上海科学技术出版社
(上海钦州南路 71 号 邮政编码 200235)
新华书店上海发行所经销
常熟市文化印刷有限公司印刷
开本 787 × 1092 1/16 印张 45.25
字数: 682 千字
2008 年 6 月第 1 版 2008 年 6 月第 1 次印刷
印数: 1—1 250
定价: 98.00 元

本书如有缺页、错装或损坏等严重质量问题,
请向工厂联系调换

前 言

在较早的年代,我就注意到 Litvin 教授于俄国在齿轮技术方面所做的出色工作。其中之一是 McGraw - Hill 图书公司供给过我 Litvin 教授对我的几本书撰写的评论的译文。

Litvin 博士和他的家庭于 1979 年移居美国。此后不久,就开始了他的研究活动。在 1979 年至 1993 年这一期间,Litvin 博士对齿轮技艺做出了很重要的贡献。作为芝加哥伊利诺依大学机械工程学教授,他曾指导了大量涉及齿轮几何学和齿轮所有类型在应用方面的研究项目。直齿圆柱齿轮几何学是比较简单的,然而圆锥齿轮、蜗杆蜗轮、端面齿轮等,它们的几何关系则是十分复杂的。

除去教书以外,Litvin 博士还为几个大公司和美国国家航空航天局(NASA)做过非常重要的咨询工作。这些工作涉及到低噪声、高强度、结构紧凑和受载轮齿(虽然有偏差和某些不可避免的制造误差)具有良好吻合等实用方面的课题。

《齿轮几何学与应用理论》这本书是 Litvin 博士的最高成就。该书给出了对工业中使用的全部不同种类的齿轮进行计算机计算的数学知识。

从齿轮领域机床制造者的大量工作中所获得的实际经验也收入了本书。从事齿轮几何设计、齿轮制造和使用的人员将会发现这本书是必不可少的。

Darle W. Dudley

于加利福尼亚,圣迭戈

Dudley 先生是最杰出的国际闻名的齿轮专家,他对齿轮的设计和制造作出了不可估量的贡献。Dudley 先生是美国和法国颁发的许多奖赏的获得者。

PTR Prentice Hall

原 序

这本书是作者力图在一部专著中包容现代齿轮啮合理论和多种齿轮传动型式的几何学的一种尝试。本书的内容是以作者在两个长时间段落：(i)首先是在俄国(前苏联)和(ii)然后是在美国(她被证明是最繁荣的),所完成的深入细致的研究工作为基础的。作者愿意与他的 75 名博士研究生共享给予任一研究成果的荣誉,作者与他们一起试验了所提出的各种想法,并将其应用于工业。如果没有美国国家航空航天局 Lewis 研究中心、Gleason 纪念基金会和其他许多齿轮公司强有力的支持,反映作者研究工作最高成就的这本书是不可能完成的。

作者前两本用俄文撰写的关于齿轮啮合理论的书是由令人难忘的编辑 George A. Volpert 分别于 1960 年和 1968 年大胆地向工程界介绍的。这两个版本均由国楷博士译成中文*,他是作者以前的一位博士研究生,对于他的热诚工作,作者表示非常感谢。第二个版本还由 Zeno Terplan 博士和 Josef Drobni 博士译成匈牙利文,他们的工作完成得很出色。

当美国国家航空航天局 Lewis 研究中心决定于 1989 年出版作者的书名为《Theory of Gearing》(齿轮啮合理论)的专著时,对作者来说是一个重大而愉快的事件。作者对于将其思想介绍给讲英语的读者,愿向美国国家航空航天局和美国陆军部表示深切的谢意。

作者特别要感谢 Erwin V. Zaretsky 先生、John J. Coy 博士、Gilbert J. Weden 先生和 Dennis P. Townsend 先生对本书出版给予的鼓励和支持。仔细的技术校订工作是由 Robert F. Handschuh 完成的,这一工作使本书得到了有益的订正,并且编就了很好的索引。

这部书并不是和原先的美国国家航空航天局的版本相竞争,而是将其大大地加以扩展和补充。这本新书包含了几乎所有齿轮传动型式的几何问题和设计问题。迅速加强齿轮研究工作以及先进技术的新需要,激

* 俄文第一版由丁淳译,第二版由卢贤占等译。两个版本均由国楷最后审校——译校注。

励着作者去完成这部著作。重大的新课题,例如,用计算机数控机床加工具有新拓扑结构的、实际齿面的偏差为最小的以及利用齿轮齿面的新拓扑结构减小振动的齿轮等,均包括在本书的内容中。用于直升机传动装置的端面齿轮传动的设计和几何学、蜗杆蜗轮传动、摆线齿轮传动、Novikov - Wildhaber 双圆弧齿轮、非圆形齿轮以及其他型式的齿轮传动的大量信息,现在也被包括在本书内。

通过作者及其追随者们的新发现,齿轮啮合理论在本书中得到大大充实。本书的内容包含:由于齿轮安装误差而使两齿面的线接触转变成点接触的转换点的确定;两共轭齿面的法曲率、主曲率和主方向以及曲面挠率(短程挠率)之间的普遍关系式;用预先设定的传动误差抛物线函数吸收因安装误差而引起的传动误差线性函数;边缘接触的和避免等等。曲面和曲线的曲率的详细研究、齿轮两齿面的啮合和接触的计算机模拟、齿轮运动学、齿轮分析和综合的数学基础,都可能是研究人员特别感兴趣的。

作者希望这本书不仅将用作参考书,也将用作教科书。渐开线外齿轮和内齿轮传动、摆线齿轮传动等各章,以及蜗杆蜗轮传动的某些部分可供大学生学习。整部书可供研究生学习。作者本人在芝加哥伊利诺依大学的讲课中就是这样做的。齿轮的设计和制造对齿轮工程师和研究人员是很关心的问题。

最后,作者愿向通读本书某些章节,并且做出非常有益和有眼光的评论的 Y. Gutman 博士表示衷心的感谢。

作者非常感谢 J. - C. Wang 博士、N. - X. Chen 博士和 C. - L. Hsiao 博士在准备本书手稿和出版工作中所给予的非常宝贵的帮助。

中文版序言

我感到高兴和荣幸的是,我的《齿轮几何学与应用理论》这部著作已被译成中文出版。科研人员的最大满足是有机会与其同行们共享他的思想。一个没有追随者的科学家就像一棵不结果实的树。

我与中国工程界的合作开始于很久以前的 20 世纪 60 年代,并且一直继续到现在。我曾经指导过 18 位中国科研人员的博士论文,并且感到自豪的是,他们在中国、美国、中国台湾的高等学校和一流的齿轮公司里都获得了高的职位。在这些人员的名字中,我愿意提及中国工程院院士、北京航空航天大学张启先教授以及审校过我的 1960 年和 1968 年俄文版《齿轮啮合原理》中译本的国楷博士。

我愿意和与我共同发展并试验了这本书的思想的学生和助手们共享这部著作所获得的任何赞誉。

非常感谢国楷博士和他的帮助者们认真翻译了我的这部著作。

Faydor L. Litvin

译者的话

F. L. 李特文(Litvin)教授于1979年移居美国,并在芝加哥伊利诺依大学(University of Illinois at Chicago)任教。在此期间,他先后撰写了两本有关齿轮啮合原理方面的专著。第一本发表于1989年,由美国国家航空航天局(NASA)出版,书名为《齿轮啮合原理(Theory of Gearing)》。第二本写成于1994年,由美国PTR Prentice Hall出版发行,书名为《齿轮几何学与应用理论(Gear Geometry and Applied Theory)》。

第一本专著至今尚未译成中文。

本书是第二本专著的中译本,参加翻译的人员和分工如下。

1. 国楷: 前言、原序、第一章、第四章至第九章、第十七章和第二十三章;

2. 叶凌云: 第二章、第三章、第十六章、第十九章至第二十二章、第二十四章和第二十五章,这部分译稿谢佩娟作了初校;

3. 范琳: 第十章和第十三章;

4. 刘志鸣: 第十一章和第十二章;

5. 胡景江: 第十四章、第十五章和第十八章。

全书译稿统由国楷进行了校订。

本书的出版得到了中国工程院院士张启先教授的热心帮助和华睿集团董事局主席兼总裁李河君先生的财务支持,范大烽教授审读了校样。另外,李特文教授在百忙中为中译本的出版撰写了“中文版序言”。在这里对他们的帮助和支持表示衷心的感谢。

由于校译者水平有限,译文中难免有错误和不当之处,敬希读者批评指正。

译者

目 录

08	.....	面草机工的轴齿轴轴轴	1.3
58	.....	轴由面平	章四第
58	.....	示考数参	1.3
58	.....	示考数参	5.3
58	.....	轴去轴轴轴轴轴轴面平	5.3
15	.....	轴曲轴轴轴轴面平	1.1
前言	.....		1
原序	.....		1
中文版序言	.....		1
译者的话	.....		1
28	.....	轴去轴轴轴轴轴轴	5.3
第一章 坐标变换	.....		1
1.1 齐次坐标	.....		1
1.2 坐标变换的矩阵表示	.....		2
1.3 绕轴线的转动	.....		7
1.4 转动和移动的 4×4 矩阵	.....		16
1.5 坐标变换实例	.....		17
1.6 用于导出曲线	.....		27
1.7 用于导出曲面	.....		31
811	.....	轴去轴轴轴轴轴轴	5.3
第二章 相对速度	.....		36
2.1 矢量表示	.....		36
2.2 矩阵表示	.....		42
2.3 斜对称矩阵的应用	.....		44
581	.....	轴去轴轴轴轴轴轴	5.3
第三章 瞬心线、瞬轴面和工作节面	.....		46
3.1 瞬心线概念	.....		46
3.2 节圆(Pitch Circle)*	.....		51
3.3 工作节圆(Operating Pitch Circle)*	.....		52
3.4 绕相交轴转动的瞬轴面	.....		54
3.5 绕相错轴转动的瞬轴面	.....		56

3.6	相错轴齿轮的工作节面	60
第四章	平面曲线	62
4.1	参数表示	62
4.2	隐函数表示	63
4.3	平面曲线的切线和法线	63
4.4	平面曲线的曲率	71
第五章	曲面	83
5.1	曲面的参数表示	83
5.2	曲线坐标	84
5.3	切面和曲面的法线	85
5.4	曲面用隐函数表示	87
5.5	曲面实例	88
第六章	共轭曲面和共轭曲线	105
6.1	曲面族的包络——包络存在的必要条件	105
6.2	基本运动关系	111
6.3	不产生根切的条件	112
6.4	曲面族包络存在的充要条件	115
6.5	瞬时接触线和啮合面	118
6.6	产形曲面 Σ_1 上瞬时接触线族的包络	119
6.7	极限接触法线的 Wildhaber 定则	121
6.8	过渡区段的加工	123
6.9	双参数包络	128
6.10	啮合轴	132
6.11	啮合枢纽点	136
6.12	问题	140
第七章	曲面和曲线的曲率	158
7.1	引言	158
7.2	三维空间内的空间曲线	158

7.3	曲面的曲线	170
7.4	第一和第二基本齐式	183
7.5	主方向和主曲率	189
7.6	Euler 方程	199
7.7	Gauss 曲率和曲面上点的三种型式	201
7.8	Dupin 标线	204
7.9	短程线和曲面挠率	207
第八章 配对曲面：曲率关系式和接触椭圆		
8.1	引言	213
8.2	基本方程	214
8.3	平面齿轮啮合：两曲率之间的关系式	215
8.4	配对曲面主曲率之间的直接关系式	231
8.5	配对曲面法曲率之间的直接关系式	240
8.6	曲率矩阵的对角线化	246
8.7	接触椭圆	250
第九章 啮合和接触的计算机模拟		
9.1	引言	258
9.2	局部接触综合	259
9.3	轮齿接触分析	268
9.4	两包络曲面由线接触转换为点接触	277
9.5	边缘接触	282
第十章 渐开线直齿外齿轮		
10.1	引言	287
10.2	渐开线曲线的几何学	287
10.3	用各种刀具加工渐开线	294
10.4	轮齿元素的比例尺寸	300
10.5	渐开线齿轮与齿条刀具的啮合	301
10.6	在不同圆周上量得的各齿厚之间的关系式	307
10.7	渐开线外齿轮的啮合	310

10.8	重迭系数	315
10.9	非标准齿轮	317
第十一章 渐开线内齿轮		
11.1	引言	329
11.2	齿轮过渡曲线的形成	330
11.3	不产生根切的条件	335
11.4	装配引起的干涉	341
第十二章 非圆形齿轮		
12.1	引言	345
12.2	非圆形齿轮的瞬心线	348
12.3	封闭瞬心线	350
12.4	椭圆齿轮和变形椭圆齿轮	353
12.5	瞬心线为凸形的条件	356
12.6	偏心圆形齿轮与非圆形齿轮的共轭	358
12.7	相同的瞬心线	359
12.8	非圆形齿轮组合机构的设计	361
12.9	应用非圆形靠模齿轮的加工法	364
12.10	加工非圆形齿轮的包络法	365
12.11	齿廓的渐屈线	370
12.12	压力角	372
附录 12.A	用齿条刀具加工非圆形齿轮的位移函数	374
附录 12.B	用插齿刀加工非圆形齿轮的位移函数	377
第十三章 摆线齿轮传动		
13.1	引言	380
13.2	摆线曲线的形成	381
13.3	摆线的方程	385
13.4	Camus 定理及其应用	386
13.5	外啮合针轮传动	391
13.6	内啮合针轮传动	397

13.7	瞬心线外的摆线齿轮传动	400
13.8	Root's 鼓风轮	403
第十四章 平行轴渐开线螺旋齿齿轮		
14.1	引言	408
14.2	一般原理	408
14.3	渐开线螺旋面	411
14.4	螺旋齿齿轮与齿条的啮合	416
14.5	配对螺旋齿齿轮的啮合	427
14.6	不产生根切的条件	432
14.7	重迭系数	433
14.8	力的传递	435
14.9	轮齿接触分析的结果	439
14.10	专门术语	439
第十五章 相错轴渐开线螺旋齿齿轮		
15.1	引言	441
15.2	工作节圆柱	441
15.3	共轭齿面的形成	442
15.4	相错轴渐开线螺旋齿齿轮的加工	446
15.5	非标准齿轮和标准齿轮的设计	447
15.6	相错轴渐开线螺旋齿齿轮的啮合	453
15.7	重迭系数	457
15.8	啮合的模拟	459
15.9	专门术语	463
第十六章 双圆弧螺旋齿齿轮		
16.1	引言	465
16.2	加工和啮合	466
16.3	小轮和大轮的齿面	468
16.4	接触椭圆	469
16.5	啮合的模拟	471

16.6	详细的推导	477
第十七章 端面齿轮传动 484		
17.1	引言	484
17.2	瞬轴面、节面和节点	485
17.3	端面齿轮的加工	487
17.4	接触痕迹限制在局部	487
17.5	端面齿轮齿面的方程	490
17.6	Σ_s 上接触线族的包络	496
17.7	不产生根切的条件	497
17.8	过渡曲面	499
17.9	端面齿轮轮齿的变尖	500
17.10	设计的推荐值	503
17.11	啮合的计算机模拟	505
17.12	无安装误差端面齿轮传动中的接触迹线	513
17.13	理论的和实际的重迭系数	516
17.14	应用在直升机传动装置中的端面齿轮传动	516
第十八章 圆柱蜗杆蜗轮传动 519		
18.1	引言	519
18.2	节面和传动比	520
18.3	设计参数及其关系式	525
18.4	ZA 型蜗杆的加工及几何关系	530
18.5	ZN 型蜗杆的加工及几何关系	535
18.6	ZI (渐开线)型蜗杆的加工及几何关系	550
18.7	ZK 型蜗杆的几何关系及加工	558
18.8	ZF I 型蜗杆(方案 I)的几何关系及加工	567
18.9	ZF II 型蜗杆(方案 II)的几何关系及加工	576
18.10	螺旋面的普遍方程	580
18.11	蜗杆和蜗轮齿面的啮合方程	582
18.12	啮合区	585

第十九章 双包围蜗杆蜗轮传动	590
19.1 引言	590
19.2 蜗杆和蜗轮齿面的加工	590
19.3 蜗杆齿面的方程	595
19.4 啮合方程	596
19.5 接触线	599
19.6 蜗轮齿面的方程	600
第二十章 准双曲面齿轮	604
20.1 引言	604
20.2 瞬轴面和工作节圆锥	604
20.3 两准双曲面节圆锥的切触	605
20.4 辅助方程	608
20.5 准双曲面节圆锥的设计	610
20.6 加工准双曲面大轮	617
20.7 加工小轮的齿面	618
20.8 局部接触综合和轮齿接触分析	623
第二十一章 螺旋面的加工	625
21.1 引言	625
21.2 用指状刀具加工: 刀具面给定	627
21.3 用指状刀具加工: 工件的齿面给定	630
21.4 用盘状刀具加工: 刀具面给定	634
21.5 用盘状刀具加工: 工件的齿面给定	638
第二十二章 飞刀的设计	642
22.1 引言	642
22.2 蜗杆齿面的双参数表示形式	643
22.3 蜗杆齿面的三参数表示形式	645
22.4 使用的方程	646
第二十三章 利用计算机数控机床加工齿面	655

23.1	引言	655
23.2	实现计算机数控机床的运动	656
23.3	加工准双曲面小齿轮	660
23.4	加工具有最佳近似的齿面	662
第二十四章 滚针(滚珠)测量法		
24.1	引言	681
24.2	问题的说明	681
24.3	测量渐开线蜗杆、渐开线螺旋齿和直齿齿轮	686
24.4	测量非对称的阿基米德螺杆	692
第二十五章 齿轮实际齿面的坐标测量和偏差的最小化		
25.1	引言	697
25.2	测量和模拟方法的概述	698
25.3	理论齿面 Σ_i 的方程	699
25.4	用于坐标测量的坐标系	700
25.5	网格和参考点	701
25.6	实际齿面的偏差	702
25.7	偏差的最小化	703
参考文献		705

第一章 坐标变换

1.1 齐次坐标

三维空间内的位置矢量(图 1.1.1)可以用矢量形式

$$\vec{r}_m = \overline{O_m M} = x_m \vec{i}_m + y_m \vec{j}_m + z_m \vec{k}_m \quad (1.1.1)$$

表示,式中 $(\vec{i}_m, \vec{j}_m, \vec{k}_m)$ 是坐标轴的单位矢量,或者用列矩阵

$$\vec{r}_m = \begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m \end{bmatrix} \quad (1.1.2)$$

表示。下角标“ m ”指明,位置矢量表示在坐标系 $S_m(x_m, y_m, z_m)$ 中。为了减少篇幅,在标记矢量时,我们还用行矩阵

$$\vec{r}_m = [x_m, y_m, z_m]^T \quad (1.1.3)$$

表示位置矢量。上角标“ T ”表示 \vec{r}_m^T 是关于 \vec{r}_m 的转置矩阵。

一个点——位置矢量的顶端——在笛卡儿坐标系中用三个数 (x, y, z) 来确定。一般说来,坐标变换在矩阵运算中需要进行矩阵的混合运算。在这种运算中,必须使用矩阵的乘法和加法。然而,如果位置矢量用齐次坐标表示,则只有矩阵乘法是需要的。在机械原理里,利用齐次坐标进行坐标

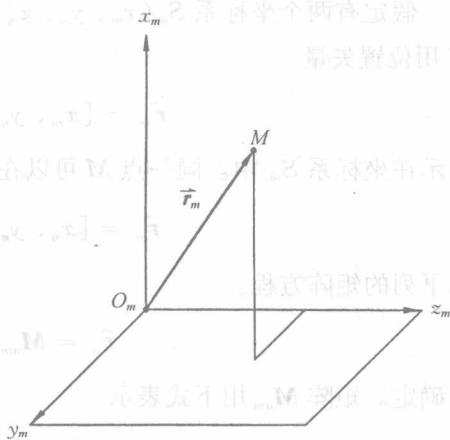


图 1.1.1 在笛卡儿坐标系中的位置矢量