




国家科学技术学术著作出版基金资助出版

齿形链啮合原理

Meshing Theory of Silent Chains

孟繁忠 著



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国家科学技术学术著作出版基金资助出版

齿形链啮合原理

孟繁忠 著

机械工业出版社

本书作为 2007 年度国家科学技术学术著作出版基金资助项目，是作者在已完成的和正在主持的国家自然科学基金（50275062、50575089）以及省部级基金项目最新研究成果的基础上，结合多年来生产、教学、科研过程中的工程应用实例、科学研究总结和技术经验积累撰写而成的。

本书阐述了圆销式齿形链和滚销式（Hy-Vo）齿形链的啮合原理及其设计方法。全书共分 10 章，内容包括：齿形链分类、齿形链啮合原理、齿形链啮合设计、齿形链和链轮参数设计、齿形链传动系统运动学与动力学分析、齿形链与链轮的接触动态响应、齿形链磨损特性与噪声分析、齿形链中心距计算方法与测量技术等。

本书可作为从事机械设计、机械传动、机械制造专业的师生、科学研究人员的重要参考书，也可供链条、链轮、刀具、发动机、变速器、分动箱、机床等行业的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

齿形链啮合原理/孟繁忠著. —北京:机械工业出版社, 2008.5

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

ISBN 978-7-111-24085-3

I. 齿… II. 孟… III. 齿形—啮合原理 IV. TH132.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 064965 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:沈红 版式设计:霍永明 责任校对:陈立辉

封面设计:陈沛 责任印制:李妍

北京蓝海印刷有限公司印刷

2008 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 11.75 印张 · 4 插页 · 227 千字

0001—4000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-24085-3

定价:38.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010) 68326294

购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010) 88379778

封面无防伪标均为盗版

前 言

齿形链是一种应用广泛的重要机械基础件,特别是在高速、重载、低噪声、大中心距的工况下,其传动性能优于齿形带传动、齿轮传动以及滚子链传动,已成为众多行业首选的传动形式之一。但是,这一专业性很强的领域以往并未引起国内足够的重视。随着高速链传动技术的不断发展,近年来,新型的适用于主机“个性化”需求的不同结构形式、不同啮合机制的高速齿形链产品系列在发达国家不断问世,其所覆盖的应用行业、形成的市场需求,以及所提供的研究空间是前所未有的,其优异的传动性能已越来越引起国内相关行业的关注和重视。由于缺乏必要的理论支持和技术支撑,国内目前尚不具备自主研发新型齿形链系列产品的能力,许多重要主机(如汽车发动机、变速器、分动箱等)一直处于主要依赖国外高价进口新型齿形链系列产品的被动局面。

目前,国内外尚没有齿形链啮合原理的专著,关于齿形链的研究论文也很少,就是这些为数不多的研究论文中,其所研究的也只是普通外啮合圆销式齿形链和普通外啮合 Hy-Vo 齿形链的运动学与动力学分析,而对于近年来相继问世的、量大面广的、各种新的啮合机制的圆销式齿形链和滚销式(Hy-Vo)齿形链,国内外均未有相关文献加以研究与论述。由此可见,主导和垄断这一领域市场与技术的极少数发达国家对这一关键技术的重视和保护。所以,研究新型齿形链的啮合原理及其设计方法,已成为国内相关学科和行业亟待解决的共性关键技术,这是一项基础性、前瞻性的研究工作,具有重要的学术价值和实用意义。

国内外有关齿轮啮合原理的专著和论文已发表很多。虽然齿轮啮合设计的某些基本公式可以参考和借鉴,但由于齿形链与链轮的刚柔体传动系统及其啮合就位状态不同于齿轮传动,啮合设计体系也不同于齿轮传动,因而齿轮啮合原理及其设计方法并不适用于齿形链传动系统。

作者在国家自然科学基金(50575089、50275062)、国家科技型中小企业技术创新基金、机械工业技术发展基金等项目的资助和支持下,在多年来的生产、教学、科研合作过程中,通过理论分析、设计计算、建模仿真、试验研究、工程应用等一系列重要研究工作,提出了具有我国自主知识产权的齿形链-链轮-刀具齿条系统的啮合原理及其设计方法,自主研发了新型齿形链系列产品,并已成功应用于相关行业和企业。

本书的出版,希望进一步引起相关学科和行业对这一研究领域的重视与关

注,从而使这一领域的研究工作更加深入,研究成果更趋完善。

本书共分10章,在介绍了齿形链分类、齿形链应用领域及应用前景、国内外研究现状与发展趋势的基础上,重点论述了各种不同啮合机制的圆销式齿形链和滚销式 Hy-Vo 齿形链的啮合原理及其设计方法,齿形链和链轮主要参数的设计方法,以及齿形链中心距计算方法与测量技术。同时本书还阐述了新型齿形链的运动学与动力学特性、磨损特性以及新型 Hy-Vo 齿形链的噪声分析等。

本书在撰写过程中,得到了我的学生冯增铭博士、李启海博士、李春博士、曲绍朋博士生、董成国博士生、邢建恒硕士等的大力支持与协助,书中的有关试验得到了合作企业的大力支持与协助,在此一并表示由衷的感谢。

作者特别感谢国家科学技术学术著作出版基金对本书的出版所给予的资助和支持,同时感谢机械工业出版社将本书作为重点图书安排出版。

由于作者水平有限,书中难免存在不妥之处,敬请读者指正。

孟繁忠

2008年2月于吉林大学

作者的通信地址:130022,长春市人民大街5988号,吉林大学(南岭校区)链传动研究所。

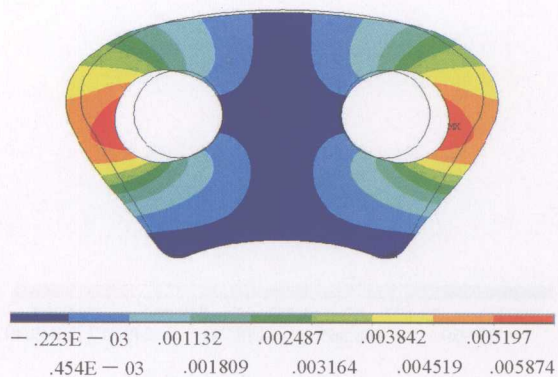


图 5-12 普通导板有限元分析的伸长量云图

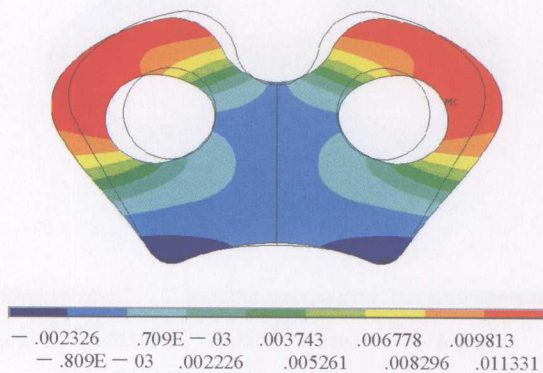


图 5-13 $H_c = 2H/3$ 的蝴蝶状导板有限元分析的伸长量云图 ($R_c = 1.86\text{mm}$)

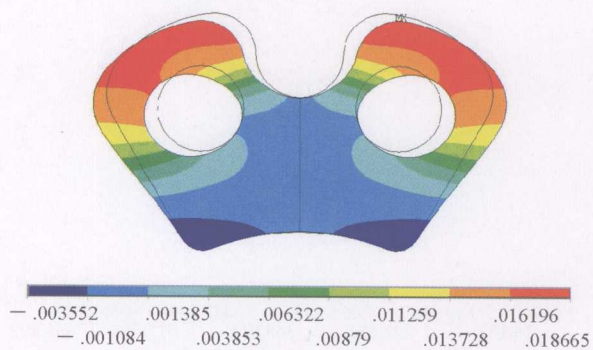


图 5-14 $H_c = 3H/5$ 的蝴蝶状导板有限元分析的伸长量云图 ($R_c = 1.86\text{mm}$)

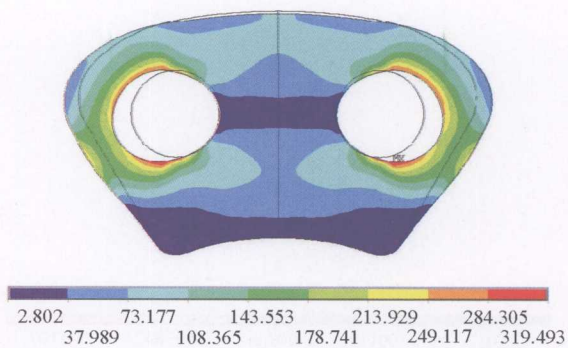


图 5-15 普通导板有限元分析的应力云图

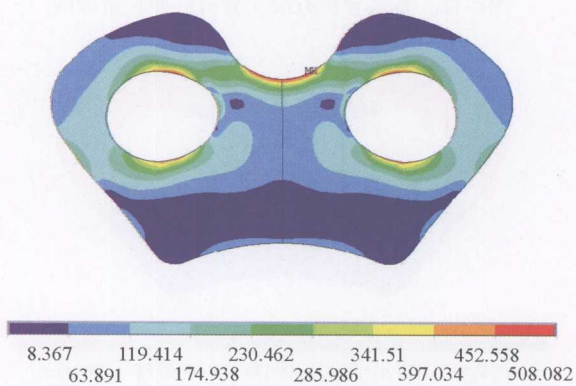


图 5-16 $H_c = 2H/3$ 的蝴蝶状导板有限元分析的应力云图 ($R_c = 1.86\text{mm}$)

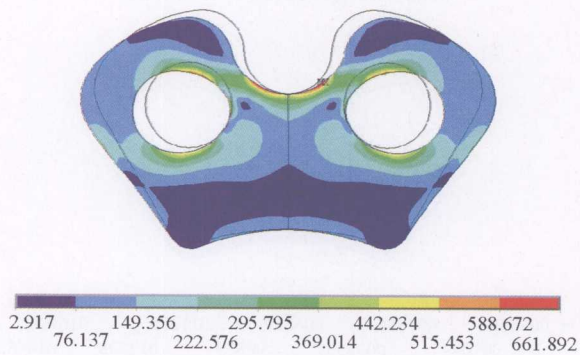


图 5-17 $H_c = 3H/5$ 的蝴蝶状导板有限元分析的应力云图 ($R_c = 1.86\text{mm}$)

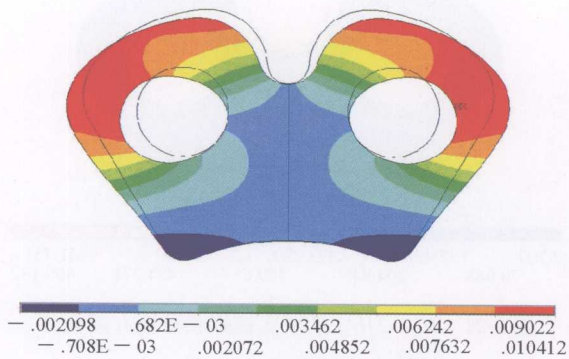


图 5-18 $H_c = 2H/3$ 的蝴蝶状导板有限元分析的伸长量云图 ($R_c = 0.93\text{mm}$)

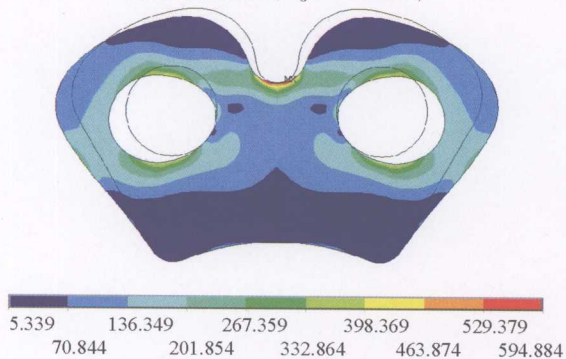


图 5-19 $H_c = 2H/3$ 的蝴蝶状导板有限元分析的应力云图 ($R_c = 0.93\text{mm}$)

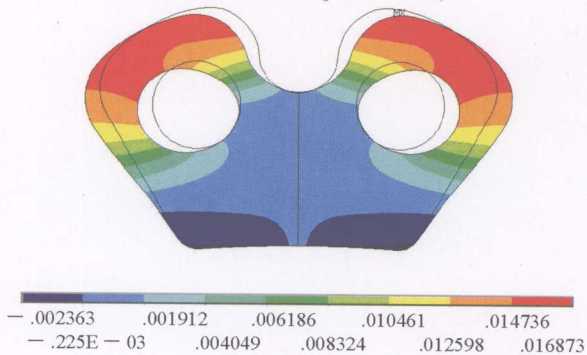


图 5-20 $H_c = 2H/3$ 的平底蝴蝶状导板有限元分析的伸长量云图 ($R_c = 1.86\text{mm}$)

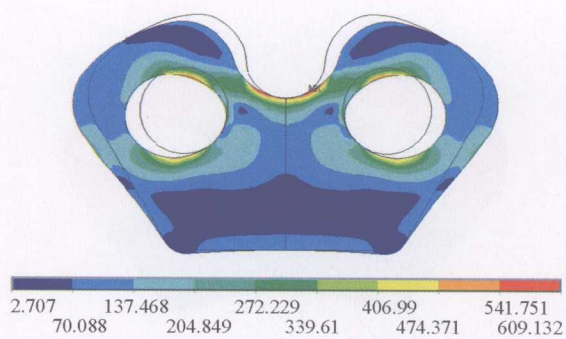


图 5-21 $H_c = 2H/3$ 的平底蝴蝶状导板有限元分析的应力云图($R_c = 1.86\text{mm}$)

目 录

前言	1
第1章 绪论	1
1.1 齿形链应用领域及应用前景	1
1.2 国内外研究现状与发展趋势	2
1.3 齿形链啮合设计技术	3
第2章 齿形链分类	6
2.1 齿形链特点	6
2.2 齿形链分类	7
2.2.1 外啮合圆销式齿形链	7
2.2.2 内啮合圆销式齿形链	7
2.2.3 内-外复合啮合圆销式齿形链	8
2.2.4 外啮合 + 内-外复合啮合圆销式齿形链	9
2.2.5 内-外复合啮合 + 内啮合圆销式齿形链	10
2.2.6 外啮合 Hy-Vo 齿形链	10
2.2.7 外啮合 + 内-外复合啮合 Hy-Vo 齿形链	11
2.2.8 内-外复合啮合 Hy-Vo 齿形链	11
2.3 齿形链产品系列	12
2.3.1 圆销式齿形链	12
2.3.2 Hy-Vo 齿形链	12
第3章 齿形链啮合原理	14
3.1 渐开线方程与坐标变换	14
3.1.1 渐开线的平面直角坐标系方程及坐标变换	14
3.1.2 渐开线的极坐标方程	16
3.2 链轮渐开线齿廓方程	16
3.3 外啮合圆销式齿形链与渐开线链轮的啮合方程	17
3.3.1 啮合定位时链板与链轮的位置方程	18
3.3.2 未定位时链板与链轮的啮入位置方程	19
3.4 内-外复合啮合圆销式齿形链与渐开线链轮的啮合方程	23
3.4.1 新型内-外复合啮合齿形链啮合原理	23
3.4.2 由内啮合转为外啮合时的交变位置	23

3.4.3	新型内-外复合啮合齿形链与链轮的初始啮入位置	27
3.4.4	新型内-外复合啮合齿形链与链轮的啮合线	28
3.5	新型内-外复合啮合齿形链的多边形效应	30
3.6	圆销式齿形链与渐开线链轮的啮入冲击	32
3.6.1	外啮合齿形链与渐开线链轮的啮入冲击	32
3.6.2	内-外复合啮合齿形链与渐开线链轮的啮入冲击	34
3.7	Hy-Vo 齿形链的多元化变异及其耦合效应	37
3.8	新型复合啮合 Hy-Vo 齿形链啮合原理	38
3.8.1	新型 Hy-Vo 齿形链啮合原理	38
3.8.2	新型 Hy-Vo 齿形链变节距特性	40
3.8.3	新型 Hy-Vo 齿形链当量边心距	42
3.9	新型 Hy-Vo 齿形链传动中的松边上凸现象	42
第4章	齿形链啮合设计	45
4.1	齿形链啮合设计体系	45
4.2	新型内-外复合啮合齿形链和外啮合齿形链啮合设计	46
4.2.1	新型齿形链、链轮、链轮滚刀的啮合设计	46
4.2.2	新型齿形链节距 p 和边心距 f 的求解	47
4.2.3	实例计算	48
4.2.4	新型齿形链与直线齿链轮的啮合设计	49
4.2.5	实例计算	49
4.3	内啮合齿形链啮合设计	50
4.3.1	内啮合齿形链啮合设计方法	50
4.3.2	实例计算	52
4.4	新型 Hy-Vo 齿形链啮合设计	52
4.4.1	Hy-Vo 齿形链与链轮的正确啮合条件	52
4.4.2	新型 Hy-Vo 齿形链、链轮、链轮滚刀的啮合设计	54
4.4.3	实例计算	55
4.5	外啮合 Hy-Vo 齿形链啮合设计	56
第5章	齿形链和链轮参数设计	59
5.1	齿形链参数设计	59
5.1.1	外啮合圆销式齿形链参数设计	59
5.1.2	新型内-外复合啮合圆销式齿形链参数设计	60
5.1.3	外啮合 Hy-Vo 齿形链参数设计	72
5.1.4	新型复合啮合 Hy-Vo 齿形链参数设计	74
5.2	齿形链链轮参数设计	76

5.2.1	齿数 z	76
5.2.2	节距 p_1	76
5.2.3	分度圆直径 d	76
5.2.4	齿顶圆直径 d_a 和齿根圆直径 d_f	76
5.2.5	量柱测量距 M_R 和量柱直径 d_R	77
5.2.6	齿楔半角 φ 、齿槽角 β 和齿形角 γ	78
5.2.7	模数 m_1	78
5.2.8	压力角 α_1	78
5.2.9	变位系数 x 和公法线长度 w	78
5.2.10	齿根过渡曲线	83
第 6 章 齿形链的运动学啮合分析		85
6.1	引言	85
6.2	ADAMS 仿真软件概述	86
6.3	分析与计算方法	87
6.3.1	广义坐标的选择	87
6.3.2	动力学方程的建立	88
6.3.3	运动学和静力学分析及初始条件分析	90
6.4	新型圆销式齿形链啮合仿真分析	93
6.4.1	啮合仿真模型	93
6.4.2	链条节距 p 对 r 的影响	95
6.4.3	链轮齿数和齿形对 r 的影响	95
6.5	新型 Hy-Vo 齿形链啮合仿真分析	99
6.5.1	啮合仿真模型	99
6.5.2	链条横向波动分析	102
第 7 章 齿形链与链轮的接触动态响应		105
7.1	引言	105
7.2	新型齿形链传动的多体动力学模型	106
7.2.1	链轮	106
7.2.2	新型齿形链链节	107
7.2.3	运动和积分方程	108
7.3	接触力分析	109
7.3.1	接触搜索策略	109
7.3.2	直线-圆弧接触	109
7.3.3	圆弧-点接触	111
7.3.4	圆弧-圆弧接触	112

7.3.5	直线-点接触	112
7.3.6	接触力模型	112
7.4	新型齿形链传动系统的接触冲击分析	113
7.4.1	新型齿形链系统的接触分析	113
7.4.2	某汽车发动机正时齿形链系统的数值求解	115
7.5	新型 Hy-Vo 齿形链传动系统的接触分析	118
第 8 章 齿形链的磨损试验研究		123
8.1	引言	123
8.2	磨损理论概述	123
8.2.1	磨损的分类	124
8.2.2	磨损过程的一般规律	124
8.2.3	材料磨损原理	125
8.2.4	磨损的转换	129
8.3	新型齿形链磨损功能分解	129
8.4	台架磨损对比试验	130
8.4.1	试验规范	130
8.4.2	试验结果及分析	131
8.5	量柱测量距与变位系数对新型齿形链啮合特性影响的试验研究	135
8.5.1	渐开线链轮量柱测量距和变位系数	136
8.5.2	试验及其结果分析	137
8.6	新型 Hy-Vo 齿形链耐磨特性	139
8.7	新型 Hy-Vo 齿形链台架磨损试验	141
8.7.1	试验规范	141
8.7.2	磨损曲线	141
8.7.3	磨损形态	142
8.7.4	磨损表面形貌	143
8.7.5	循环特性	144
8.7.6	新型 Hy-Vo 齿形链温度场特性的研究	144
第 9 章 齿形链噪声分析		151
9.1	引言	151
9.2	噪声分析基础理论	151
9.2.1	噪声的主要参数及意义	152
9.2.2	噪声的测量方法	153
9.2.3	噪声信号的处理分析	156
9.3	新型 Hy-Vo 齿形链的噪声测试试验	158

9.4 新型 Hy-Vo 齿形链的噪声分析	160
9.4.1 噪声分析仪器及软件	160
9.4.2 噪声测试结果及分析	160
第 10 章 齿形链产品中心距计算方法与测量技术	165
10.1 新型 Hy-Vo 齿形链中心距的计算方法	165
10.1.1 模型简化假设	165
10.1.2 外啮合 Hy-Vo 齿形链中心距波动量的数学模型	165
10.1.3 外啮合中心距波动量的计算	169
10.1.4 内-外复合啮合 Hy-Vo 齿形链中心距波动量的分析与估算	172
10.2 齿形链中心距测量技术	174
参考文献	177

第 1 章

绪 论

1.1 齿形链应用领域及应用前景

齿形链是一种应用广泛的重要机械基础件，特别是在高速、重载、低噪声、大中心距的工况下，其传动性能优于齿形带传动、齿轮传动以及滚子链传动，已成为众多行业首选的传动形式之一^[1]。近年来汽车发动机（正时传动、机油泵、共轨泵、高压泵、平衡轴等）、变速器、分动箱、摩托车、叉车、汽轮机、飞机、船舶、轧钢机械、机床、工业泵，以及在其他高速传动中，越来越广泛地应用了各种形式的齿形链，而且随着高速链传动技术的不断发展，新型的、适应于主机“个性化”需求的不同结构形式、不同啮合机制的高速齿形链产品系列不断在发达国家问世，并进入国内市场。由于缺乏必要的理论支持和技术支撑，国内目前尚不具备自主研发新型齿形链系列产品的能力，一直处于主要依赖国外高价进口新型齿形链系列产品的被动局面。

仅以汽车发动机为例，国内的一汽轿车、一汽大众、一汽马自达、一汽丰田、上海大众、上海通用、上海比亚迪、北京吉普、北汽福田、广州本田、东风本田、长安福特、哈尔滨东安、沈阳华晨、南京菲亚特、福建东南、安徽奇瑞、保定长城、海南马自达、浙江吉利、长丰猎豹、唐山爱信、天津爱信、上海采埃孚、广州加特可等众多汽车发动机和变速箱、分动箱中，都采用了不同结构形式、不同啮合机制的齿形链系列产品。国外 GM、Ford、Chrysler、BenZ、BMW、Audi、VW、Mazda、Toyota、Honda、Nissan、Mitsubishi、Suzuki、Volvo、Fiat、Citroen 等众多汽车发动机、变速箱、分动箱中，均广泛采用了齿形链系列产品，并且近年来大有逐渐取代齿形带传动的发展趋势。除了汽车发动机以外，其他众多主机和高速传动中采用齿形链的也越来越广泛，越来越“个性化”。其

所提供的研究领域、覆盖的应用行业、形成的市场需求,以及重大的经济效益与社会效益等是前所未有的。

近年来,随着高速传动技术的不断发展,齿形链传动主动链轮的转速通常高达 5000~8000r/min,有的甚至已超过 10000r/min^[2],其允许磨损伸长率仅为 $\varepsilon \leq 1\%$ ($\varepsilon = \Delta L/L$, ΔL —链条磨损伸长量, L —初始链长)。除了高速多次冲击特性外,齿形链大多还承受着高速下的变速与变载服役工况。由于齿形链的高速、大载荷、低噪声、强磨损,以及速度与载荷的交变特性,从而使其啮合原理的研究、刚柔体传动系统的设计方法及其产品设计技术,构成了学科的一个重要前沿研究领域,而这一问题以往并未引起国内足够的重视,从而进一步加大了与发达国家在这一领域中本来就存在的较大差距。近年来,随着市场的广泛需求、工程应用中技术支撑的缺失以及研究工作的不断深入,已引起相关学科和行业的高度关注。

1.2 国内外研究现状与发展趋势

目前,国内外尚没有关于齿形链啮合原理的专著。这方面的研究论文也很少,而这些为数不多的研究论文所论述的内容,也只是普通外啮合圆形基准孔的 Hy-Vo 齿形链的运动学与动力学分析^[3-6]。由于当时的研究条件与手段的限制,以及某些基本假设与实际工况的不符,因而其研究成果不仅在啮合原理上有误,而且无法应用于这类齿形链产品的设计与研发。

特别是近年来,相继问世了内-外复合啮合机制的圆销式齿形链,有序排列的外啮合+内-外复合啮合机制的圆销式齿形链,非圆基准孔的 Hy-Vo 齿形链,有序排列的外啮合+内-外复合啮合机制的 Hy-Vo 齿形链等一系列新一代齿形链产品,并逐渐成为齿形链传动的主导产品系列,而且与之相啮合的大负变位的齿形链链轮齿形也呈现了多元性趋势。对于这一类已形成主导传动形式与产品的齿形链啮合原理及其设计方法,除作者近期发表的相关论文^[7-10]有所探讨和论述外,国内外均未有相关文献加以分析与研究。由此可见,研究齿形链,特别是研究新型齿形链的啮合原理及其设计方法,已构成了学科和行业亟待解决的共性关键技术。在面对学科和行业急需理论支持和技术支撑的情况下,出版《齿形链啮合原理》这部专著,不仅具有重要的学术价值,而且具有重大的实用意义。

应该指出,这一共性关键技术面对的不仅仅是机械传动学科,也面对着机械设计和机械制造学科,面对的不仅仅是链条、链轮行业,也面对着刀具、汽车、摩托车、叉车、机床、汽轮机等行业。

关于齿形链产品,目前尚未制订 ISO 国际标准。已有的各国齿形链及链轮标

准为：中国 GB 10855—2003《传动用齿形链及链轮》（等同采用 ASME B29.2M—1982）；中国 JB/T 10348—2002《摩托车用齿形链条》；美国 ASME B29.2M—1982《传动用齿形链和链轮》；德国 DIN 8190—1988《30°压力角滚动铰接式齿形链》；德国 DIN 8191—1998《齿形链链轮齿形》；俄罗斯 ГОСТ 13552—1981《齿形传动链》；俄罗斯 ГОСТ 13576—1981《齿形链链轮》。

上述各国齿形链标准规定的均为普通外啮合圆销式齿形链和普通外啮合 Hy-Vo 齿形链的互换性尺寸参数，并未涉及啮合原理及其设计方法，而对于目前国际上应用的不同啮合机制的主导齿形链产品系列均未涉及。

关于齿形链产品，虽然美国 Morse 已拥有多项专利技术和内部技术诀窍，但其产品的结构形式与啮合机制近年来也在不断完善、变异、创新和升级^[11]，并且主导和垄断着这一领域的市场与技术。日本 D. I. D 和椿本的齿形链设计技术，在消化吸收 Morse 设计技术的基础上也有所创新。德国 IWIS 近年来也在研发新型齿形链系列产品。上述所有设计技术与研究成果均未公开。

我国近年来众多轿车上应用的齿形链系列产品，大多是由 Morse、D. I. D 进口的。不仅价格昂贵，而且供货周期长。国内曾试制过几种规格的圆销式齿形链和普通外啮合 Hy-Vo 链，但由于主要以测绘和仿制为主，因而其主要性能远远达不到主机厂的要求。必须指出，事实证明了单独研究齿形链产品设计，而不研究齿形链-链轮-刀具的啮合原理与滚切原理，这种研究方法和开发模式是不可取的，也是难以成功的。

作者多年来在与企业技术合作的生产、教学、科研结合过程中，接触到的众多汽车发动机、摩托车发动机、汽轮机、链条、链轮、刀具行业的企业家和工程技术人员所反馈的大量信息表明，国内尚未形成自主研发新型齿形链产品系列的能力。国内众多高等院校的机械设计理论专业和机械传动学科，近年来也开始关注齿形链啮合原理及其设计方法这一热点问题，通过与其他高等院校来访的教师、博士、硕士的交流，深切感受到学科发展与完善也需要相关研究成果予以支持与补充。

国内外有关齿轮啮合原理的专著^[12-15]和论文已发表很多，虽然齿轮啮合设计的某些基本公式可以参考和借鉴，但由于齿形链与链轮的刚柔体传动系统及其啮合就位状态不同于齿轮传动，因而齿轮啮合原理及其设计方法并不适用于齿形链传动系统，必须分析与研究齿形链与链轮特有的啮合原理，提出适用于不同啮合机制的齿形链传动的设计方法。

1.3 齿形链啮合设计技术

作者近年来先后主持了科技部中小企业技术创新基金“高强度汽车发动机