

# 齿形链啮合原理

第2版

孟繁忠 著



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

# 齿形链啮合原理

第2版

孟繁忠 著



机械工业出版社

本书是在国家自然科学基金(50275062、50575089、50975117、51275207)和国家863计划项目(2009AA04Z109)及省部级基金项目最新研究成果的基础上,结合多年来产学研过程中的科学研究总结、技术经验积累和工程应用实例撰写而成的。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11章,内容包括绪论、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、齿形链运动学啮合分析、齿形链与链轮的接触动态响应、齿形链磨损试验研究、齿形链噪声分析、齿形链中心距计算方法与测量技术、齿形链链轮滚刀设计等。

本书可作为从事机械设计、机械传动、机械制造专业师生、科研人员的参考书,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. —2版. —北京:机械工业出版社, 2014.9

ISBN 978-7-111-47598-9

I. ①齿… II. ①孟… III. ①齿形-链条-啮合原理  
IV. ①TH132.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第180965号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:沈红 责任编辑:沈红

版式设计:霍永明 责任校对:刘怡丹

封面设计:陈沛 责任印制:刘岚

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

2015年1月第2版第1次印刷

169mm×239mm·17印张·3插页·316千字

0001—2000册

标准书号:ISBN 978-7-111-47598-9

定价:59.80元



凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010)68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203 封面无防伪标均为盗版

策划编辑电话:(010)88379778

## 第2版前言

本书第1版作为国家科学技术学术著作出版基金资助项目,自2008年出版以来,受到了相关学科和行业的热情关注,引发了对这一研究领域热点问题的思考和讨论。许多高等院校将本书选作机械设计及理论专业的研究生教材,相关行业以本书的研究成果为基础,自主研发了新型齿形链和新型 Hy-Vo 齿形链系列产品,产生了重大的经济效益与社会效益。本书第1版2010年获得了中国机械工业科学技术进步奖。

本书第1版出版后,作者又先后承担了国家863计划项目“基于复杂多元变异的 Hy-Vo 链数字化设计方法研究及平台开发”(2009AA04Z109)和国家自然科学基金项目“基于多元变异的新型 Hy-Vo 齿形链啮合设计理论”(50975117)、“基于复杂约束边界条件下的多轴高速齿形链系统啮合设计理论”(51275207),取得了许多具有重要学术价值和实用意义的研究成果。同时,作者在产学研合作过程中又产生了许多新的技术积累。

为了进一步满足行业和学科发展的需求,《齿形链啮合原理》(第2版)在第1版的基础上,对其中部分内容进行了必要的调整和充实,并进行了更加深入的分析与研究。考虑到读者对齿形链—链轮—刀具齿条系统设计的关注,第2版新增加了第11章“齿形链链轮滚刀设计”,同时,为了推动齿形链新技术的不断发展,在相关章节中新增加了“基于多元变异的新型 Hy-Vo 齿形链啮合设计”“心形孔 Hy-Vo 齿形链变节距特性和当量边心距”“心形孔 Hy-Vo 齿形链与链轮的啮合设计”“心形孔 Hy-Vo 齿形链参数设计”“菱形孔 Hy-Vo 齿形链参数设计”“Hy-Vo 齿形链异型导板的设计方法”“大负变位的齿形链链轮齿根过渡曲线的求解方法”汽车分动箱用“圆形基准孔 Hy-Vo 齿形链系统啮合仿真分析”“汽车发动机正时齿形链系统的接触分析”、汽车分动箱用“圆形基准孔 Hy-Vo 齿形链系统的接触力分析”及“汽车发动机正时齿形链系统的噪声分析”等重要内容,以期使这一领域的研究工作更加深入,研究成果更加实用,从而构建更趋完善的具有我国自主知识产权的齿形链和 Hy-Vo 齿形链啮合设计理论与设计方法。

本书第2版在撰写过程中,程亚兵博士、董成国博士、刘小光博士、曲绍朋博士等给予了大力协助,书中的有关试验得到了相关合作企业的大力支持,在此一并表示由衷的感谢。

同时,作者再一次感谢国家科学技术学术著作出版基金对本书第1版的出



## 第1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

# 目 录

## 第2版前言

## 第1版前言

|                                             |    |
|---------------------------------------------|----|
| 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 齿形链啮合设计理论 .....                         | 3  |
| 第2章 齿形链分类 .....                             | 7  |
| 2.1 齿形链特点 .....                             | 7  |
| 2.2 齿形链分类 .....                             | 8  |
| 2.2.1 外啮合圆销式齿形链 .....                       | 8  |
| 2.2.2 内啮合圆销式齿形链 .....                       | 9  |
| 2.2.3 内-外复合啮合圆销式齿形链 .....                   | 9  |
| 2.2.4 外啮合+内-外复合啮合圆销式齿形链 .....               | 10 |
| 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 $H_y - V_o$ 齿形链 .....             | 11 |
| 2.2.7 内-外复合啮合+外啮合 $H_y - V_o$ 齿形链及其变异 ..... | 12 |
| 2.2.8 内-外复合啮合 $H_y - V_o$ 齿形链 .....         | 14 |
| 2.2.9 双相传动 $H_y - V_o$ 齿形链 .....            | 15 |
| 2.3 齿形链产品系列 .....                           | 16 |
| 2.3.1 圆销式齿形链 .....                          | 16 |
| 2.3.2 滚销式齿形链 .....                          | 16 |
| 第3章 齿形链的啮合原理 .....                          | 17 |
| 3.1 渐开线方程与坐标变换 .....                        | 17 |
| 3.1.1 渐开线的平面直角坐标系方程及坐标变换 .....              | 17 |
| 3.1.2 渐开线的极坐标方程 .....                       | 19 |
| 3.2 链轮渐开线齿廓方程 .....                         | 19 |
| 3.3 外啮合齿形链与渐开线链轮的啮合方程 .....                 | 20 |
| 3.3.1 啮合定位时链板与链轮的位置方程 .....                 | 20 |
| 3.3.2 未定位时链板与链轮的啮入位置方程 .....                | 22 |
| 3.4 新型内-外复合啮合齿形链与渐开线链轮的啮合方程 .....           | 25 |

|                          |                                      |           |
|--------------------------|--------------------------------------|-----------|
| 3.4.1                    | 新型内-外复合啮合齿形链啮合原理 .....               | 25        |
| 3.4.2                    | 由内啮合转为外啮合时的交变位置 .....                | 26        |
| 3.4.3                    | 新型内-外复合啮合齿形链与链轮的初始啮入位置 .....         | 30        |
| 3.4.4                    | 新型内-外复合啮合齿形链与渐开线齿形链轮的啮合线 .....       | 31        |
| 3.5                      | 新型内-外复合啮合齿形链的多边形效应 .....             | 33        |
| 3.6                      | 内啮合齿形链与链轮的啮合线 .....                  | 35        |
| 3.6.1                    | 内啮合齿形链与链轮的啮合定位分析 .....               | 35        |
| 3.6.2                    | 内啮合齿形链与链轮的初始啮合状态 .....               | 35        |
| 3.6.3                    | 内啮合齿形链与链轮的啮合线 .....                  | 36        |
| 3.7                      | 齿形链与渐开线链轮的啮入冲击 .....                 | 37        |
| 3.7.1                    | 外啮合齿形链与渐开线链轮的啮入冲击 .....              | 37        |
| 3.7.2                    | 内-外复合啮合齿形链与渐开线链轮的啮入冲击 .....          | 39        |
| 3.8                      | Hy-Vo 齿形链的多元化变异及其耦合效应 .....          | 42        |
| 3.9                      | 新型 Hy-Vo 齿形链啮合原理 .....               | 44        |
| 3.9.1                    | 新型 Hy-Vo 齿形链的啮合的原理 .....             | 44        |
| 3.9.2                    | 非圆形基准孔和菱形孔新型 Hy-Vo 齿形链变节距特性 .....    | 45        |
| 3.9.3                    | 非圆形基准孔和菱形孔新型 Hy-Vo 齿形链当量边心距 .....    | 47        |
| 3.9.4                    | 心形孔 Hy-Vo 齿形链变节距特性 .....             | 48        |
| 3.9.5                    | 心形孔 Hy-Vo 齿形链当量边心距 .....             | 49        |
| 3.9.6                    | 圆形基准孔 Hy-Vo 齿形链的节距与边心距变化规律 .....     | 50        |
| 3.10                     | 新型 Hy-Vo 齿形链传动中的松边上凸现象 .....         | 50        |
| <b>第4章 齿形链啮合设计 .....</b> |                                      | <b>53</b> |
| 4.1                      | 齿形链啮合设计体系 .....                      | 53        |
| 4.2                      | 新型内-外复合啮合齿形链和外啮合齿形链啮合设计 .....        | 54        |
| 4.2.1                    | 新型齿形链-渐开线齿形链轮-链轮滚刀的啮合设计 .....        | 54        |
| 4.2.2                    | 新型齿形链节距 $p$ 和边心距 $f$ 的求解 .....       | 55        |
| 4.2.3                    | 实例计算 .....                           | 56        |
| 4.2.4                    | 新型齿形链与直线齿形链轮的啮合设计 .....              | 57        |
| 4.2.5                    | 实例计算 .....                           | 58        |
| 4.3                      | 内啮合齿形链啮合设计 .....                     | 59        |
| 4.3.1                    | 内啮合齿形链啮合设计方法 .....                   | 59        |
| 4.3.2                    | 实例计算 .....                           | 60        |
| 4.4                      | 新型 Hy-Vo 齿形链啮合设计 .....               | 60        |
| 4.4.1                    | Hy-Vo 齿形链与链轮的正确啮合条件 .....            | 60        |
| 4.4.2                    | 新型 Hy-Vo 齿形链-渐开线齿形链轮-链轮滚刀的啮合设计 ..... | 62        |

|                                                         |            |
|---------------------------------------------------------|------------|
| 4.4.3 实例计算 .....                                        | 63         |
| 4.4.4 新型 Hy - Vo 齿形链与直线齿形链轮的啮合设计 .....                  | 65         |
| 4.4.5 心形孔 Hy - Vo 齿形链 - 渐开线齿形链轮 - 链轮滚刀的啮合设计 .....       | 65         |
| 4.5 基于多元变异的新型 Hy - Vo 齿形链啮合设计 .....                     | 68         |
| 4.5.1 基于多元变异的 Hy - Vo 齿形链啮合设计体系 .....                   | 68         |
| 4.5.2 变异 Hy - Vo 齿形链啮合设计方法 .....                        | 69         |
| 4.5.3 变异 Hy - Vo 齿形链的缠绕圆、接触圆和当量边心距 .....                | 71         |
| 4.6 外啮合 Hy - Vo 齿形链啮合设计 .....                           | 73         |
| 4.6.1 圆形基准孔 Hy - Vo 齿形链固有特性 .....                       | 73         |
| 4.6.2 圆形基准孔 Hy - Vo 齿形链啮合设计 .....                       | 73         |
| <b>第 5 章 齿形链和链轮参数设计 .....</b>                           | <b>76</b>  |
| 5.1 齿形链参数设计 .....                                       | 76         |
| 5.1.1 外啮合圆销式齿形链参数设计 .....                               | 76         |
| 5.1.2 新型内 - 外复合啮合齿形链参数设计 .....                          | 77         |
| 5.1.3 外啮合 Hy - Vo 齿形链参数设计 .....                         | 89         |
| 5.1.4 新型复合啮合 Hy - Vo 齿形链参数设计 .....                      | 91         |
| 5.1.5 心形孔 Hy - Vo 齿形链参数设计 .....                         | 97         |
| 5.1.6 菱形孔 Hy - Vo 齿形链参数设计 .....                         | 99         |
| 5.1.7 圆形基准孔 Hy - Vo 齿形链链板结构有限元分析 .....                  | 102        |
| 5.2 齿形链链轮参数设计 .....                                     | 105        |
| 5.2.1 链轮基本参数 ( $z$ 、 $p_1$ 、 $m_1$ 、 $\alpha_1$ ) ..... | 105        |
| 5.2.2 链轮直径尺寸 ( $d$ 、 $d_a$ 、 $d_f$ ) .....              | 106        |
| 5.2.3 量柱测量距 $M_R$ 和量柱直径 $d_R$ .....                     | 107        |
| 5.2.4 齿楔角 $2\alpha$ 、齿槽角 $\beta$ 和齿形角 $\gamma$ .....    | 107        |
| 5.2.5 变位系数 $x$ 和公法线长度 $w$ .....                         | 108        |
| 5.2.6 大负变位的齿形链链轮齿根过渡曲线的求解方法 .....                       | 118        |
| <b>第 6 章 齿形链的运动学啮合分析 .....</b>                          | <b>122</b> |
| 6.1 引言 .....                                            | 122        |
| 6.2 ADAMS 仿真软件概述 .....                                  | 123        |
| 6.3 分析与计算方法 .....                                       | 124        |
| 6.3.1 广义坐标的选择 .....                                     | 124        |
| 6.3.2 动力学方程的建立 .....                                    | 125        |
| 6.3.3 运动学和静力学分析及初始条件分析 .....                            | 127        |
| 6.4 新型齿形链啮合仿真分析 .....                                   | 130        |
| 6.4.1 啮合仿真模型 .....                                      | 130        |

|            |                             |            |
|------------|-----------------------------|------------|
| 6.4.2      | 链条节距 $p$ 对 $r_1$ 的影响        | 132        |
| 6.4.3      | 链轮齿数和齿形对 $r_1$ 的影响          | 132        |
| 6.5        | 新型 Hy - Vo 齿形链啮合仿真分析        | 136        |
| 6.5.1      | 啮合仿真模型                      | 136        |
| 6.5.2      | 链条横向波动分析                    | 139        |
| 6.6        | 圆形基准孔 Hy - Vo 齿形链传动系统啮合仿真分析 | 141        |
| 6.6.1      | 引言                          | 141        |
| 6.6.2      | 圆形基准孔 Hy - Vo 齿形链传动系统简化     | 141        |
| 6.6.3      | 传动系统的运动学基础理论                | 142        |
| 6.6.4      | 传动系统的动力学基础理论                | 145        |
| 6.6.5      | 传动系统虚拟样机模型                  | 149        |
| 6.6.6      | 传动系统仿真结果及分析                 | 151        |
| <b>第7章</b> | <b>齿形链与链轮的接触动态响应</b>        | <b>155</b> |
| 7.1        | 引言                          | 155        |
| 7.2        | 新型齿形链传动的多体动力学模型             | 156        |
| 7.2.1      | 链轮                          | 156        |
| 7.2.2      | 新型齿形链链节                     | 157        |
| 7.2.3      | 运动和积分方程                     | 158        |
| 7.3        | 接触力分析                       | 159        |
| 7.3.1      | 接触搜索策略                      | 159        |
| 7.3.2      | 直线 - 圆弧接触                   | 159        |
| 7.3.3      | 圆弧 - 点接触                    | 161        |
| 7.3.4      | 圆弧 - 圆弧接触                   | 162        |
| 7.3.5      | 直线 - 点接触                    | 162        |
| 7.3.6      | 接触力模型                       | 162        |
| 7.4        | 新型齿形链传动系统的接触冲击分析            | 163        |
| 7.4.1      | 新型齿形链系统的接触分析                | 163        |
| 7.4.2      | 某汽车发动机正时齿形链系统的数值求解          | 165        |
| 7.5        | 新型 Hy - Vo 齿形链传动系统的接触分析     | 168        |
| 7.6        | 汽车发动机正时齿形链系统的接触分析           | 172        |
| 7.6.1      | 汽车发动机正时齿形链系统                | 172        |
| 7.6.2      | 汽车发动机正时齿形链系统载荷的模拟           | 173        |
| 7.6.3      | 汽车发动机正时齿形链系统动力学仿真结果分析       | 173        |
| 7.7        | 圆形基准孔 Hy - Vo 齿形链系统的动态接触力分析 | 176        |
| 7.7.1      | 被测铰链的接触力                    | 176        |

|                                       |     |
|---------------------------------------|-----|
| 7.7.2 齿形链传动系统传动力流 .....               | 177 |
| 7.7.3 链节与链轮之间的接触力 .....               | 177 |
| <b>第8章 齿形链的磨损试验研究</b> .....           | 179 |
| 8.1 引言 .....                          | 179 |
| 8.2 磨损理论概述 .....                      | 179 |
| 8.2.1 磨损的分类 .....                     | 180 |
| 8.2.2 磨损过程的一般规律 .....                 | 180 |
| 8.2.3 材料磨损原理 .....                    | 181 |
| 8.2.4 磨损的转换 .....                     | 185 |
| 8.3 新型齿形链磨损功能分解 .....                 | 185 |
| 8.4 台架磨损对比试验 .....                    | 186 |
| 8.4.1 试验规范 .....                      | 186 |
| 8.4.2 试验结果及分析 .....                   | 187 |
| 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 ..... | 191 |
| 8.5.1 渐开线齿形链轮量柱测量距和变位系数 .....         | 191 |
| 8.5.2 试验及其结果分析 .....                  | 192 |
| 8.6 新型 Hy - Vo 齿形链耐磨特性 .....          | 194 |
| 8.7 新型 Hy - Vo 齿形链台架磨损试验 .....        | 196 |
| 8.7.1 试验规范 .....                      | 196 |
| 8.7.2 磨损曲线 .....                      | 196 |
| 8.7.3 磨损形态 .....                      | 197 |
| 8.7.4 磨损表面形貌 .....                    | 198 |
| 8.7.5 循环特性 .....                      | 199 |
| 8.7.6 新型 Hy - Vo 齿形链温度场特性的研究 .....    | 199 |
| 8.8 汽车正时齿形链系统的温度特性 .....              | 205 |
| <b>第9章 齿形链噪声分析</b> .....              | 207 |
| 9.1 引言 .....                          | 207 |
| 9.2 噪声分析基础理论 .....                    | 207 |
| 9.2.1 噪声的主要参数及意义 .....                | 208 |
| 9.2.2 噪声的测量方法 .....                   | 209 |
| 9.2.3 噪声信号的处理分析 .....                 | 212 |
| 9.3 新型 Hy - Vo 齿形链的噪声测试试验 .....       | 214 |
| 9.4 新型 Hy - Vo 齿形链的噪声分析 .....         | 216 |
| 9.4.1 噪声分析仪器及软件 .....                 | 216 |
| 9.4.2 噪声测试结果及分析 .....                 | 216 |

|                                                |            |
|------------------------------------------------|------------|
| 9.5 汽车发动机正时齿形链系统的噪声分析 .....                    | 220        |
| 9.5.1 试验设备及试验规范 .....                          | 220        |
| 9.5.2 汽车发动机正时齿形链系统的噪声分析 .....                  | 222        |
| <b>第10章 齿形链产品中心距计算方法与测量技术 .....</b>            | <b>228</b> |
| 10.1 Hy - Vo 齿形链中心距变动量的计算方法 .....              | 228        |
| 10.1.1 模型简化假设 .....                            | 228        |
| 10.1.2 外啮合 Hy - Vo 齿形链中心距变动量的数学模型 .....        | 229        |
| 10.1.3 外啮合 Hy - Vo 齿形链中心距变动量的计算 .....          | 232        |
| 10.1.4 内 - 外复合啮合 Hy - Vo 齿形链中心距变动量的分析与估算 ..... | 235        |
| 10.2 齿形链中心距测量技术 .....                          | 238        |
| 10.3 齿形链中心距链长精度 .....                          | 239        |
| <b>第11章 齿形链链轮滚刀设计 .....</b>                    | <b>241</b> |
| 11.1 齿形链链轮滚刀的结构型式和基本尺寸 .....                   | 241        |
| 11.2 渐开线齿形链轮滚刀设计 .....                         | 243        |
| 11.2.1 滚刀的齿形设计 .....                           | 243        |
| 11.2.2 滚刀的分圆直径与螺旋线导程角 .....                    | 245        |
| 11.2.3 滚刀的切削角度 .....                           | 245        |
| 11.2.4 链轮滚刀设计示例 .....                          | 246        |
| 11.3 直线齿形链轮滚刀设计 .....                          | 250        |
| 11.3.1 用齿廓法线法求滚刀法向齿形 .....                     | 250        |
| 11.3.2 直线齿形链轮滚刀设计示例 .....                      | 253        |
| <b>参考文献 .....</b>                              | <b>256</b> |

# 第1章

## 绪论

### 1.1 齿形链应用领域及应用前景

齿形链（常称之为“无声链”）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、齿轮传动及滚子链传动，并已成为众多行业首选的传动形式之一<sup>[1]</sup>。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”需求的不同结构型式、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，国内目前尚不完全具备自主研发新型齿形链系列产品的能力，故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、北京吉普、北京现代、北汽福田、广汽丰田、广汽本田、东风本田、东风神龙、东风标致、东风雪铁龙、长安福特、沈阳华晨、比亚迪、浙江吉利、安徽奇瑞、保定长城、郑州日产、哈尔滨东安、南京菲亚特、福建东南、海南马自达、江淮、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器、分动箱中，都采用了不同结构型式、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、变速器、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  $5000 \sim 8000 \text{ r/min}$ ,有的甚至已超过  $10000 \text{ r/min}^{[2]}$ ,其允许磨损伸长率仅为  $\varepsilon \leq 1\%$  ( $\varepsilon = \Delta L/L$ ,  $\Delta L$ —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,使其啮合原理的研究、基于复杂约束边界条件下的多轴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已存在的较大差距。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<sup>[3-6]</sup>。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<sup>[7-13]</sup>有所探讨和论述外,国内外有关这方面的研究成果却很少。由此可见,研究齿形链,特别是研究新型圆销式齿形链和新型滚销式齿形链的啮合原理、设计方法及其变异技术,已构成了学科和行业亟待解决的共性关键技术。在面临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,目前尚未制定 ISO 国际标准。已有的各国齿形链及链轮标准为:GB 10855—2003《传动用齿形链及链轮》(等同采用 ASME B29.2M—1982);JB/T 10348—2013《摩托车用齿形链条》;ASME B29.2M—2007《传动用齿形链和链轮》;DIN 8190—1988《30°压力角滚动铰接式齿形链》;DIN 8191—2006《齿形链链轮齿形》;ГОСТ 13552—1981《齿形传动链》;ГОСТ 13576—1981《齿形链链轮》。

上述各国齿形链标准规定的均为圆销式齿形链和普通外啮合滚销式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),而对于目前国际市场上应用的不同啮合机制的新型圆销式和新型滚销式齿形链产品系列均未涉及。

关于齿形链产品,美国 Morse 的齿形链产品结构型式与啮合机制近年来在不断完善、变异、创新和升级<sup>[14]</sup>,并且主导着这一领域的市场与技术。日本 D. I. D 公司和椿本公司及德国 IWIS 公司近年来也在研发新型齿形链系列产品。但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 公司、D. I. D 公司进口的。不仅价格昂贵,而且供货周期长。近几年,国内曾研制过几种规格的圆销式齿形链和滚销式齿形链,但并未形成完整的产品系列和核心竞争力。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—刀具齿条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。

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,国内尚未形成完全自主研发新型圆销式齿形链和新型滚销式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<sup>[15-18]</sup>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,并提出适用于不同啮合机制的齿形链传动的设计方法。

### 1.3 齿形链啮合设计理论

作者近年来承担和完成了国家自然科学基金“新型高速齿形链啮合原理及其设计方法”(50275062)、国家自然科学基金“新型 Hy-Vo 齿形链啮合机理

及其设计方法”(50575089)、国家自然科学基金“基于多元变异的新型 Hy - Vo 齿形链啮合设计理论”(50975117)、国家 863 计划项目“基于复杂多元变异的 Hy - Vo 链数字化设计方法研究及平台开发”(2009AA04Z109)和科技部中小企业技术创新基金“高强度汽车发动机用链”(01C26213300872)、国家机械工业技术发展基金“微型齿形链新齿形设计方法”(99JA0002)等多项科研项目。

目前,作者正在承担一项国家自然科学基金项目“基于复杂约束边界条件下的多轴高速齿形链系统啮合设计理论”(51275207)。

在上述基金项目的资助和支持下,在与企业的合作过程中,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、适用于本土化的齿形链-链轮-刀具齿条系统的啮合原理及其设计方法;自主研发了新型圆销式齿形链和新型滚销式齿形链的系列产品,并已成功应用于相关行业和企业;打破了少数发达国家的技术垄断,实现了技术上的原始创新;从而推动了学科发展,拉动了行业的技术进步,并取得了显著的经济效益与社会效益。而且利用这一新的系统设计方法,可以建立我国拥有的性能更为优良的新型圆销式齿形链和新型滚销式齿形链产品系列型谱,为国产新型圆销式齿形链和新型滚销式齿形链进入并继而主导国际市场提供有力的技术支撑;同时,也为建立学科前沿领域的高速传动理论奠定必要的基础。

本书全面系统地论述了新型圆销式齿形链和新型滚销式齿形链的啮合原理及其设计方法;首次提出了适用于不同啮合机制的齿形链与链轮的正确啮合条件;建立了不同啮合机制的齿形链-链轮-刀具齿条三者之间主要参数的谐应关系;导出了可用于指导齿形链链板齿廓、链轮齿廓及其刀具齿条齿廓设计计算的解析表达式,例如:求解齿形链节距、链板孔心距、边心距、齿形角、内侧工作齿廓曲率半径及曲率中心、链板齿高、链轮节距、链轮压力角、量柱测量距、变位系数、公法线长度、齿根圆直径、齿顶圆直径、分度圆直径、齿根过渡曲线、齿顶圆顶切圆弧半径等,以及链轮滚刀法向齿距、法向齿形角、齿顶圆弧半径、齿根圆弧半径等。通过齿形链的啮合仿真分析,研究了齿形链工作齿廓主要参数的变化规律,阐述了实现内-外复合啮合新机制的必要条件;通过理论计算和仿真分析,研究了圆形基准孔、非圆形基准孔、心形孔和菱形孔滚销式齿形链的变节距特性,揭示了两个对滚异型销轴表面上的定点运动轨迹为心形线,并提出了 Hy - Vo 齿形链“当量边心距”的新概念,以及指出了“定位偏置角”的设计原则;通过齿形链的运动学仿真分析,指出了新型圆销式齿形链和新型滚销式齿形链可有效实现其特有的显著减小多边形效应、减小冲击和振动、降低噪声、减轻磨损的重要功能。

本书阐述了在考虑新型齿形链工作链板孔与销轴之间间隙的前提下,利用