

# Technology Handbook of Chain Transmission

# 链传动技术手册

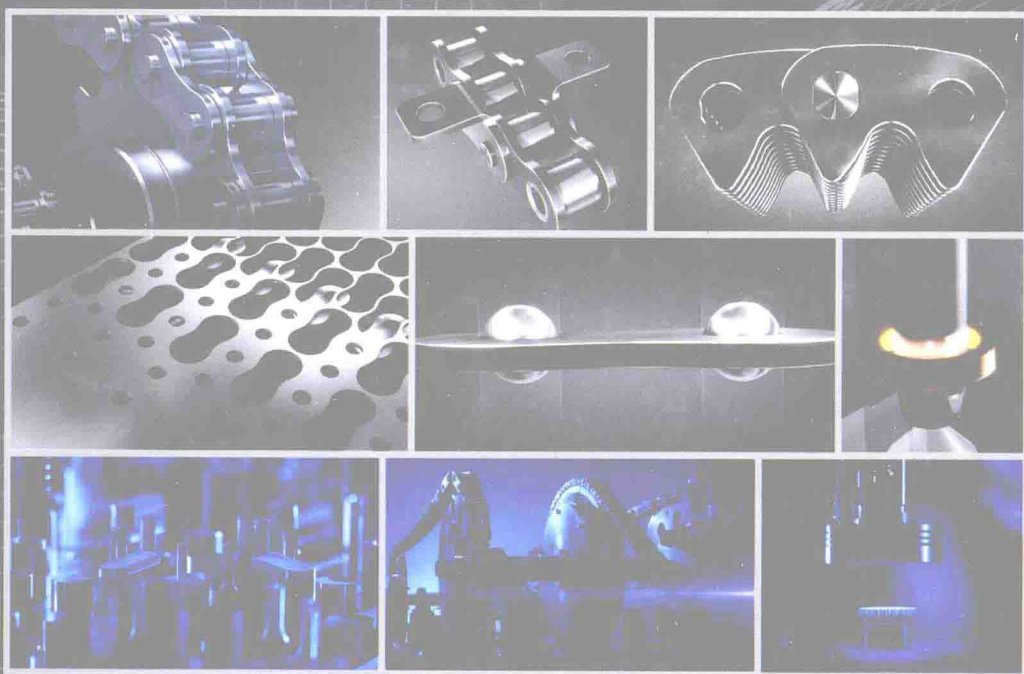
中国机械工程学会机械传动分会链传动专业委员会

Chain Transmission Speciality Committee of Mechanical Transmission Institute, CMES

组编

中国机械通用零部件工业协会链传动分会

Chain Transmission Association of China General Machine Components Industry Association



孟繁忠 主 编  
叶 斌 副主编

机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



# 链传动技术手册

中国机械工程学会机械传动分会链传动专业委员会  
中国机械通用零部件工业协会链传动分会

组编

孟繁忠 主 编  
叶 斌 副主编

机械工业出版社

本手册由中国机械工程学会机械传动分会链传动专业委员会和中国机械通用零部件工业协会链传动分会共同组织编著。

本手册的内容汇集了多项国家高端科研项目成果及业内许多工程实践经验。本手册共分 19 章,在介绍了链传动行业的技术研究现状与发展趋势、链条分类与标准化的基础上,论述了链传动选择计算、齿形链啮合设计、链条产品设计、链条制造工艺、链条材料及热处理工艺、链条零件渗金属技术、链条强化工艺、链条模具设计、链条产品质量检验技术、链条产品失效分析、链轮齿形、链轮加工刀具的设计、汽车链传动系统设计、链传动仿真分析、链传动噪声分析、链传动润滑技术、链条制造与检测试验设备。在附录中,列出了链传动产品的 ISO、GB、JB、ASME、DIN、BS、JIS 标准目录,以及部分链传动产品的 GB、JB 标准的相关内容和常用中外钢号对照表、硬度对照表和渐开线函数表。

本手册可作为链传动行业工程技术人员的重要参考书,也可供从事机械设计、机械传动、机械制造专业的师生、科研人员和工程技术人员参考。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

链传动技术手册/孟繁忠主编;中国机械工程学会  
机械传动分会链传动专业委员会,中国机械通用零部件工  
业协会链传动分会组编. —北京:机械工业出版社,  
2016.8

ISBN 978 - 7 - 111 - 54070 - 0

I. ①链… II. ①孟…②中…③中… III. ①链传动  
—手册 IV. ①TH132.45 - 62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 140303 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 臧弋心

版式设计:霍永明 责任校对:任秀丽 李锦莉

责任印制:常天培

北京京丰印刷厂印刷

2016 年 9 月第 1 版·第 1 次印刷

184mm×260mm·56 印张·2 插页·1388 千字

0 001—2 000 册

标准书号:ISBN 978 - 7 - 111 - 54070 - 0

定价:249.00 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

服务咨询热线:010-88379833 机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-88379469 机工官博:weibo.com/cmp1952

010-88379203 教育服务网:www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网:www.golden-book.com

# 《链传动技术手册》编辑委员会

主任委员 孟繁忠 宣碧华

副主任委员 金玉谟 黄伟达 寿飞峰 楼建军

主 编 孟繁忠

副 主 编 叶 斌

## 参编人员及分工（按编写章节的顺序排名）

孟繁忠：第1章、第4章、第13章、第14章、第17章、第18章

邵慧敏：第2章（除2.8、2.10.4外）、附录A、C、D、E、G

卢建富：2.8（部分内容）、2.10.4（部分内容）、5.8、5.11、6.8、10.11

拱建军：3.1~3.4

卢继光：3.5、3.6、5.1.4、5.2.4、6.1.3、6.2.3、附录B

卢旭东：3.7、第7章（除7.1.3外）、8.3、8.4

魏一波：3.8、5.6.3、6.6

王 胜：5.1.1、5.12、6.1.1、6.10

翁建良：5.1.2、6.1.2

金丽君：5.1.3、6.3、8.1、8.2

尹德兵：5.2.1、6.2.1（部分）

付振明：5.2.3、6.2.2、第10章（除10.11外）

王洪军：5.2.2、5.3.1、6.2.1（部分）、6.3.1、15.2、附录F

钱 江：5.3.2、6.3.2

许惠康：5.4、5.5、6.4、6.5

周 健：5.6.1、5.6.2、5.7、5.9、6.7、6.9

杜立光：5.10、6.11

蒋海明：5.13、6.12

杨伟明：7.1.3

王丽丽：第9章（合编）

樊 磊：第9章（合编）

许树新：第11章（除11.7外）

程亚兵：11.7、第12章、16.1~16.4

邢建恒：15.1、19.2

冯增铭：16.5

刘小光：16.6

叶 斌：第19章，同时组织所在企业的参编人员撰写并审核

# 前 言

链传动产品是重要的机械基础件。通常，链传动是一种具有中间挠性件的非共轭啮合传动，它兼有齿轮传动和带传动的一些特点，特别是在大中心距、定速比、多轴传动的工况下及环境恶劣的开式传动、冲击振动大的传动、大载荷的低速传动、润滑良好的高速传动中，采用链传动将带来明显的技术效益与经济效益。

链传动适应的工况相当广泛，传递功率为  $0.1 \sim 5000\text{kW}$ ，效率达  $98\%$ ，传动比可达到  $10$  以上，线速度可高达  $45\text{m/s}$  以上；在正常传动工况下，对于短节距滚子链，其使用寿命可达  $15000\text{h}$ 。

链传动广泛用于汽车、高速列车、摩托车、自行车、船舶、航空航天器械、军用车辆、机床、农业机械、林业机械、冶金机械、矿山机械、工程机械、起重运输机械、石油化工机械、建材机械、轻工机械、纺织机械、食品药品器械、办公机械、环保机械等众多行业，链传动产品已成为一种关系到国计民生的量大面广的重要机械基础件。

目前，我国拥有链传动产品（链条、链轮、正时系统、链条联轴器、链式输送机等）生产企业  $300$  余家，职工  $6$  万多人，其中工程技术人员  $3000$  多人。生产的链传动产品已有  $20000$  多个品种规格，为国内外市场提供了数量越来越多、质量越来越好的链传动产品。但是，我国的链条生产，在品种、规格、产品性能上与发达国家尚有一定差距，特别是在严酷服役条件（如剧烈冲击、高速、高温、强磨损、强腐蚀等）下工作的链传动产品，在高精度和高性能齿形链、Hy-Vo 齿形链、CVT 无级变速器链上与国外名牌产品的差距较大。

近年来，链传动产品在许多传动领域内已逐渐取代了部分齿轮传动和带传动，如汽车发动机的正时系统、变速箱和分动箱传动系统、CVT 无级变速器传动系统等，其应用前景非常广阔。

我国目前还没有一部全面汇集链传动理论分析与计算、系统设计、产品设计、制造工艺、热处理技术、检验规范、失效分析、噪声分析、仿真分析、模具设计、制造与检测试验设备以及链轮齿形和链轮刀具设计等最新内容的链传动技术手册。

为了满足链传动行业迅速发展的需求，为了推动行业的技术进步，中国机械工程学会机械传动分会链传动专业委员会和中国机械通用零部件工业协会链传动分会共同组织编著了这部《链传动技术手册》，并组成了由链传动专业委员会和链传动分会主要负责人担任主任委员、副主任委员的编委会。

编委会主任委员：

孟繁忠 中国机械工程学会机械传动分会链传动专业委员会主任委员，吉林大学教授博士生导师。

宣碧华 中国机械通用零部件工业协会链传动分会理事长，杭州东华链条集团有限公司董事长、总经理。

编委会副主任委员：

金玉漠 中国机械通用零部件工业协会链传动分会副理事长，青岛征和工业股份有限公司董事长、总裁。

黄伟达 中国机械通用零部件工业协会链传动分会副理事长，苏州环球集团科技股份有限公司董事长、总经理。

寿飞峰 中国机械通用零部件工业协会链传动分会副理事长，浙江恒久机械集团董事长，安徽黄山恒久链传动有限公司董事长。

楼建军 中国机械通用零部件工业协会链传动分会副理事长，中国机械工程学会机械传动分会链传动专业委员会副主任委员，浙江金盾链条制造有限公司董事长、总经理。

本手册共分 19 章，在介绍了链传动产品的分类、链传动产品的应用领域和应用前景、国内外技术研究现状与发展趋势的基础上，论述了链传动选择计算、齿形链啮合设计的理论和方法，阐述了链条产品设计、链条制造工艺、链条材料及热处理工艺、链条零件渗金属技术、链条强化工艺、链条模具设计方法，介绍了链条产品质量检验技术和检验仪器与设备，阐述了链条产品失效分析、链轮齿形和链轮刀具的设计方法，论述了链传动噪声分析、链传动仿真分析和汽车链传动系统设计的原理与方法。同时，分析了链传动系统的润滑技术，介绍了链条产品制造设备与试验设备。在附录中，还列出了链传动产品的 ISO、GB、JB、ASME、DIN、BS、JIS 标准目录，介绍了部分链传动产品的 GB、JB 标准的相关内容，以及给出了常用中外钢号对照表、硬度对照表和渐开线函数表。

本手册中的许多新理论、新方法和新技术是在多项国家自然科学基金、国家 863 计划、国家科技型中小企业技术创新基金和省部级科研项目的最新研究成果的基础上取得的，许多先进实用技术是作者们在行业内多年的技术经验积累和工程实践的基础上创新形成的。可以说，《链传动技术手册》是一部科学、实用的技术手册。

在本手册的编写过程中，许多重点骨干企业给予了大力支持和资助，许多高等院校、科研院所和企业的专家、学者和工程技术人员积极参加了编写并提供相关资料，从而确保了本手册的顺利出版，在此一并表示由衷的感谢。

参加本手册编写的单位有：吉林大学、杭州东华链条集团有限公司、青岛征和工业股份有限公司、苏州环球集团科技股份有限公司、浙江恒久机械集团、安徽黄山恒久链传动有限公司、浙江金盾链条制造有限公司、湖州求精汽车链传动有限公司。

特别需要说明的是，浙江长兴正达电炉制造有限公司沈增芳董事长、江苏太仓椿盟链条设备制造有限公司何汉朝总经理、江苏昆山东盛精密模具有限公司邓保才总经理等有关热处理设备、链条制造设备、模具制造专业厂家的企业家对本手册的出版都给予了热情支持，编委会对此表示真诚的感谢。

由于参加本手册编写的作者来自于不同的企业，而各企业的技术风格和技术路线不尽相同，本手册各章节的编写尽量融入了各企业的不同特点，以供读者分析、参考和选用。

由于本手册涉及的内容宽泛，加之作者水平有限，本手册难免存在不妥之处，敬请读者指正。

编委会

于吉林大学 南岭校区

# 目 录

## 前言

## 第 1 章 链传动行业的技术研究

### 现状与发展趋势 ..... 1

#### 1.1 概述 ..... 1

#### 1.2 链传动技术研究现状 ..... 2

##### 1.2.1 链传动行业技术创新能力全面提升 ..... 2

##### 1.2.2 链传动行业新产品、新技术、新理论不断问世 ..... 3

#### 1.3 链传动行业技术发展趋势与展望 ..... 5

## 第 2 章 链条分类与标准化 ..... 8

### 2.1 滚子链和套筒链 ..... 8

#### 2.1.1 短节距精密滚子链和套筒链 ..... 8

#### 2.1.2 短节距精密滚子链和套筒链的标准化概述 ..... 12

#### 2.1.3 高强度精密滚子链 ..... 17

#### 2.1.4 绿色环保滚子链 ..... 18

#### 2.1.5 O 形或 X 形密封圈滚子链 ..... 18

#### 2.1.6 传动和输送用双节距精密滚子链 ..... 18

#### 2.1.7 重载传动用弯板滚子链 ..... 19

#### 2.1.8 专门用途的滚子链和套筒链 ..... 20

### 2.2 齿形链和滚销式齿形链 (Hy-Vo 齿形链) ..... 25

#### 2.2.1 齿形链的概述及标准化 ..... 25

#### 2.2.2 滚销式齿形链 (Hy-Vo 齿形链) ..... 28

#### 2.2.3 双节距齿形链 ..... 28

### 2.3 板式链及堆高机专用板式链 ..... 29

#### 2.3.1 板式链及标准化 ..... 29

#### 2.3.2 堆高机专用板式链 ..... 31

### 2.4 销轴链 ..... 33

#### 2.4.1 多板销轴链 ..... 33

#### 2.4.2 有衬套拉曳链和无衬套拉曳链 ..... 33

### 2.5 输送链 ..... 35

#### 2.5.1 输送链概述 ..... 35

#### 2.5.2 输送链标准化简述 ..... 38

#### 2.5.3 M 型、MC 型长节距 (米制)

#### 输送链及英制系列长节距输

#### 送链 ..... 38

#### 2.6 平顶链 ..... 40

#### 2.7 自动扶梯及自动人行道链条 ..... 42

##### 2.7.1 主驱动链条 (高性能精密滚子链) ..... 43

##### 2.7.2 自动扶梯梯级链及标准化 ..... 44

##### 2.7.3 自动人行道梯级链 ..... 49

##### 2.7.4 扶手带驱动链 ..... 49

#### 2.8 输送用模锻易拆链 ..... 50

##### 2.8.1 英制系列模锻链 ..... 52

##### 2.8.2 带特殊附件的模锻链 ..... 53

#### 2.9 埋刮板输送机用叉型链 ..... 54

#### 2.10 专用特种链条 ..... 57

##### 2.10.1 不锈钢链条及其标准化 ..... 57

##### 2.10.2 农机链及其标准化 ..... 62

##### 2.10.3 冶金链 (钢厂用链条) ..... 71

##### 2.10.4 水泥链及散物料输送链 ..... 74

##### 2.10.5 停车设备链条及其标准化 ..... 81

##### 2.10.6 航空链 ..... 83

#### 2.11 工程用焊接结构弯板链和曳引用焊接结构弯板链 ..... 85

##### 2.11.1 工程用焊接结构弯板链 ..... 85

##### 2.11.2 曳引用焊接结构弯板链 ..... 87

#### 2.12 无级变速器链条 ..... 88

##### 2.12.1 CVT 链 (无级变速摆销链) ..... 88

##### 2.12.2 滑片式无级变速链 (P. I. V 无级变速链) 和滚柱式无级变速链 ..... 90

#### 2.13 与链传动产品相关的设计方法、试验测试方法、检验规则和术语等标准简述 ..... 94

## 第 3 章 链传动选择计算 ..... 97

### 3.1 滚子链传动选择计算 ..... 97

#### 3.1.1 适用范围 ..... 97

#### 3.1.2 应用的符号、定义及单位 ..... 97

#### 3.1.3 基本公式 ..... 98

|                                         |     |                                             |     |
|-----------------------------------------|-----|---------------------------------------------|-----|
| 3.1.4 原始资料和链轮齿数 .....                   | 98  | 4.2.1 圆销式齿形链 .....                          | 145 |
| 3.1.5 工况系数 $f_1$ .....                  | 98  | 4.2.2 滚销式齿形链 .....                          | 146 |
| 3.1.6 齿数系数 $f_2$ 和排数系数 $f_3$ .....      | 99  | 4.3 齿形链啮合原理 .....                           | 146 |
| 3.1.7 链传动设计注意事项 .....                   | 100 | 4.3.1 新型内-外复合啮合齿形链啮合原理 .....                | 146 |
| 3.1.8 链长的计算 .....                       | 101 | 4.3.2 内啮合齿形链啮合原理 .....                      | 149 |
| 3.1.9 传动中心距的重新精确计算 .....                | 102 | 4.4 Hy-Vo 齿形链啮合原理 .....                     | 151 |
| 3.1.10 链传动计算实例 .....                    | 102 | 4.4.1 新型 Hy-Vo 齿形链啮合原理 .....                | 151 |
| 3.2 滚子链传动疲劳寿命计算 .....                   | 103 | 4.4.2 非圆形基准孔和菱形孔新型 Hy-Vo 齿形链变节距特性 .....     | 152 |
| 3.3 滚子链传动磨损寿命计算 .....                   | 103 | 4.4.3 非圆形基准孔和菱形孔新型 Hy-Vo 齿形链当量边心距 .....     | 154 |
| 3.4 滚子链传动中心距设计计算 .....                  | 106 | 4.4.4 心形孔 Hy-Vo 齿形链变节距特性 .....              | 154 |
| 3.4.1 中心距计算方法一<br>(渐开线函数法) .....        | 106 | 4.4.5 心形孔 Hy-Vo 齿形链当量边心距 .....              | 156 |
| 3.4.2 中心距计算方法二<br>(Winklhofer 法) .....  | 108 | 4.4.6 圆形基准孔 Hy-Vo 齿形链的节距与边心距变化规律 .....      | 156 |
| 3.4.3 中心距计算实例 .....                     | 109 | 4.5 齿形链啮合设计体系 .....                         | 157 |
| 3.5 齿形链传动选择计算 .....                     | 111 | 4.6 新型齿形链啮合设计 .....                         | 157 |
| 3.6 齿形链的选择及预定寿命的计算 .....                | 126 | 4.6.1 新型齿形链-渐开线齿形链轮-链轮滚刀的啮合设计 .....         | 157 |
| 3.6.1 齿形链的选择及预定寿命的计算方法 .....            | 126 | 4.6.2 新型齿形链节距 $p$ 和边心距 $f$ 的求解 .....        | 159 |
| 3.6.2 齿形链选择和传动计算的示例 .....               | 128 | 4.6.3 实例计算 .....                            | 160 |
| 3.7 水平式输送机用齿形链选择计算 .....                | 129 | 4.7 Hy-Vo 齿形链啮合设计 .....                     | 161 |
| 3.7.1 选择计算流程 .....                      | 129 | 4.7.1 Hy-Vo 齿形链与链轮的正确啮合条件 .....             | 161 |
| 3.7.2 计算实例 .....                        | 131 | 4.7.2 新型 Hy-Vo 齿形链-渐开线齿形链轮-链轮滚刀的啮合设计 .....  | 162 |
| 3.8 弯板链传动选择计算 .....                     | 132 | 4.7.3 新型 Hy-Vo 齿形链与直线齿形链轮的啮合设计 .....        | 164 |
| 3.8.1 弯板滚子链的结构 .....                    | 132 | 4.7.4 心形孔 Hy-Vo 齿形链-渐开线齿形链轮-链轮滚刀的啮合设计 ..... | 165 |
| 3.8.2 重载弯板链传动的选择计算 .....                | 132 | 4.8 Hy-Vo 齿形链的多元变异及其耦合效应 .....              | 167 |
| 3.8.3 弯板链传动设计计算 .....                   | 133 | 4.9 基于多元变异的新型 Hy-Vo 齿形链啮合设计 .....           | 168 |
| 3.8.4 弯板链设计计算示例 .....                   | 133 | 4.9.1 基于多元变异的 Hy-Vo 齿形链啮合设计体系 .....         | 168 |
| <b>第 4 章 齿形链啮合设计</b> .....              | 139 | 4.9.2 变异 Hy-Vo 齿形链啮合设计 .....                |     |
| 4.1 齿形链分类 .....                         | 139 |                                             |     |
| 4.1.1 外啮合圆销式齿形链 .....                   | 139 |                                             |     |
| 4.1.2 内啮合圆销式齿形链 .....                   | 140 |                                             |     |
| 4.1.3 内-外复合啮合圆销式齿形链 .....               | 140 |                                             |     |
| 4.1.4 外啮合 + 内-外复合啮合圆销式齿形链 .....         | 141 |                                             |     |
| 4.1.5 内-外复合啮合 + 内啮合圆销式齿形链 .....         | 141 |                                             |     |
| 4.1.6 外啮合 Hy-Vo 齿形链 .....               | 142 |                                             |     |
| 4.1.7 内-外复合啮合 + 外啮合 Hy-Vo 齿形链及其变异 ..... | 142 |                                             |     |
| 4.1.8 内-外复合啮合 Hy-Vo 齿形链 .....           | 144 |                                             |     |
| 4.1.9 双相传动 Hy-Vo 齿形链 .....              | 145 |                                             |     |
| 4.2 齿形链产品系列 .....                       | 145 |                                             |     |

|                                            |     |                                     |     |
|--------------------------------------------|-----|-------------------------------------|-----|
| 方法 .....                                   | 169 | 5.5.5 链条的强度计算 .....                 | 308 |
| 4.9.3 变异 Hy-Vo 齿形链的缠绕圆、<br>接触圆和当量边心距 ..... | 171 | 5.5.6 压出力计算 .....                   | 310 |
| 4.10 外啮合 Hy-Vo 齿形链啮合设计 .....               | 172 | 5.5.7 输送链条在不同工况、环境下<br>的设计要点 .....  | 311 |
| 4.10.1 圆形基准孔 Hy-Vo 齿形链固<br>有特性 .....       | 172 | 5.5.8 输送链设计示例 .....                 | 312 |
| 4.10.2 啮合设计 .....                          | 173 | 5.6 弯板滚子链产品设计 .....                 | 316 |
| 4.11 齿形链产品中心距计算方法与测<br>量技术 .....           | 174 | 5.6.1 弯板滚子链总装配图 .....               | 316 |
| 4.11.1 Hy-Vo 齿形链中心距变动量<br>的计算方法 .....      | 174 | 5.6.2 主要零部件 .....                   | 318 |
| 4.11.2 齿形链中心距测量技术 .....                    | 182 | 5.6.3 弯板链设计示例 .....                 | 327 |
| 4.11.3 齿形链中心距链长精度 .....                    | 184 | 5.7 输送用平顶链产品设计 .....                | 341 |
| <b>第5章 链条产品设计</b> .....                    | 185 | 5.7.1 输送用平顶链总装配图 .....              | 341 |
| 5.1 滚子链产品设计 .....                          | 185 | 5.7.2 主要零部件 .....                   | 343 |
| 5.1.1 传动用短节距滚子链产品设计 .....                  | 185 | 5.8 模锻链产品设计 .....                   | 348 |
| 5.1.2 汽车用滚子链产品设计 .....                     | 210 | 5.8.1 模锻链的总装图 .....                 | 348 |
| 5.1.3 摩托车用滚子链和套筒链产<br>品设计 .....            | 221 | 5.8.2 零件设计 .....                    | 349 |
| 5.1.4 农机用滚子链产品设计 .....                     | 237 | 5.8.3 零件的强度验算 .....                 | 355 |
| 5.2 齿形链产品设计 .....                          | 247 | 5.9 焊接结构弯板链产品设计 .....               | 356 |
| 5.2.1 汽车用内-外复合啮合齿形链<br>和外啮合齿形链产品设计 .....   | 247 | 5.9.1 焊接结构弯板链总装配图 .....             | 356 |
| 5.2.2 汽车用内啮合齿形链产品设计 .....                  | 261 | 5.9.2 主要零部件 .....                   | 358 |
| 5.2.3 摩托车用齿形链产品设计 .....                    | 262 | 5.10 冶金输送链产品设计 .....                | 367 |
| 5.2.4 工业齿形链产品设计 .....                      | 279 | 5.10.1 冶金输送链的润滑 .....               | 367 |
| 5.3 Hy-Vo 齿形链产品设计 .....                    | 284 | 5.10.2 特殊冶金输送链的疲劳、耐<br>磨和耐热性能 ..... | 369 |
| 5.3.1 圆形基准孔 Hy-Vo 齿形链产<br>品设计 .....        | 284 | 5.10.3 冶金输送链产品设计示例 .....            | 370 |
| 5.3.2 心形孔 Hy-Vo 齿形链产品<br>设计 .....          | 289 | 5.11 水泥链产品设计 .....                  | 378 |
| 5.4 板式链产品设计 .....                          | 296 | 5.11.1 结构的设计 .....                  | 378 |
| 5.4.1 链条的横向尺寸设计 .....                      | 296 | 5.11.2 主要尺寸参数的设计 .....              | 379 |
| 5.4.2 链条的纵向尺寸设计 .....                      | 297 | 5.11.3 材料的选用 .....                  | 379 |
| 5.4.3 标准结构 .....                           | 297 | 5.11.4 零件硬度的设计 .....                | 380 |
| 5.4.4 技术性能指标 .....                         | 297 | 5.12 自动扶梯链产品设计 .....                | 382 |
| 5.4.5 板式链设计示例 .....                        | 300 | 5.12.1 滚轮外置系列梯级链 .....              | 382 |
| 5.5 输送链产品设计 .....                          | 303 | 5.12.2 滚子链系列梯级链 .....               | 388 |
| 5.5.1 确定输送链的种类、规格和<br>附件形式 .....           | 304 | 5.12.3 滚轮内置系列梯级链 .....              | 389 |
| 5.5.2 确定链条参数 .....                         | 304 | 5.12.4 梯级链条的设计要点 .....              | 393 |
| 5.5.3 链条横向尺寸的设计 .....                      | 304 | 5.13 摆杆链产品设计 .....                  | 394 |
| 5.5.4 链条纵向尺寸的设计 .....                      | 306 | 5.13.1 主要技术参数 .....                 | 394 |
|                                            |     | 5.13.2 摆杆链装配图和部件图 .....             | 395 |
|                                            |     | 5.13.3 主要零部件 .....                  | 395 |
|                                            |     | <b>第6章 链条制造工艺</b> .....             | 402 |
|                                            |     | 6.1 滚子链制造工艺 .....                   | 402 |
|                                            |     | 6.1.1 传动用短节距滚子链制造<br>工艺 .....       | 402 |
|                                            |     | 6.1.2 汽车发动机滚子链制造工艺 .....            | 407 |

|                                     |     |                               |            |
|-------------------------------------|-----|-------------------------------|------------|
| 6.1.3 农机用滚子链制造工艺 .....              | 413 | 6.10 梯级链制造工艺 .....            | 459        |
| 6.2 齿形链制造工艺 .....                   | 415 | 6.10.1 链板加工工艺过程设计 .....       | 459        |
| 6.2.1 汽车用齿形链制造工艺 .....              | 415 | 6.10.2 销轴加工工艺过程设计 .....       | 460        |
| 6.2.2 摩托车齿形链制造工艺 .....              | 418 | 6.10.3 套筒加工工艺过程设计 .....       | 463        |
| 6.2.3 工业齿形链制造工艺 .....               | 428 | 6.10.4 滚子加工工艺过程设计 .....       | 463        |
| 6.3 Hy-Vo 齿形链制造工艺 .....             | 430 | 6.11 冶金输送链制造工艺 .....          | 464        |
| 6.3.1 圆形基准孔 Hy-Vo 齿形链<br>制造工艺 ..... | 430 | 6.11.1 冶金输送链关键制造技术 .....      | 464        |
| 6.3.2 心形孔 Hy-Vo 齿形链制造<br>工艺 .....   | 430 | 6.11.2 冶金输送链工艺设计说明 .....      | 465        |
| 6.4 板式链制造工艺 .....                   | 432 | 6.11.3 冶金输送链工艺流程 .....        | 465        |
| 6.4.1 原材料的确定 .....                  | 432 | 6.12 摆杆链制造工艺 .....            | 465        |
| 6.4.2 原材料改制 .....                   | 432 | 6.12.1 摆杆链制造工艺路线 .....        | 465        |
| 6.4.3 链板零件的工艺编制 .....               | 432 | 6.12.2 主要零部件关键工序 .....        | 466        |
| 6.4.4 销轴零件的工艺编制 .....               | 433 | <b>第7章 链条材料及热处理工艺 .....</b>   | <b>468</b> |
| 6.4.5 板式链装配工艺的编制 .....              | 433 | 7.1 链条材料 .....                | 468        |
| 6.4.6 板式链工艺编制案例 .....               | 434 | 7.1.1 常用材料 .....              | 468        |
| 6.5 输送链制造工艺 .....                   | 436 | 7.1.2 新材料 .....               | 468        |
| 6.5.1 原材料的确定 .....                  | 436 | 7.1.3 材料改制 .....              | 469        |
| 6.5.2 链板零件的工艺编制 .....               | 436 | 7.2 热处理技术 .....               | 475        |
| 6.5.3 销轴零件的工艺编制 .....               | 437 | 7.2.1 基本原理 .....              | 475        |
| 6.5.4 套筒零件的工艺编制 .....               | 437 | 7.2.2 淬火 .....                | 477        |
| 6.5.5 滚子零件的工艺编制 .....               | 438 | 7.2.3 等温淬火 .....              | 477        |
| 6.5.6 装配工艺的编制 .....                 | 438 | 7.2.4 回火 .....                | 477        |
| 6.5.7 输送链工艺规程编制案例 .....             | 439 | 7.2.5 退火 .....                | 478        |
| 6.6 弯板链制造工艺 .....                   | 443 | 7.2.6 正火 .....                | 478        |
| 6.6.1 链板加工 .....                    | 443 | 7.3 链条热处理工艺 .....             | 478        |
| 6.6.2 销轴加工 .....                    | 444 | 7.3.1 链板 .....                | 478        |
| 6.6.3 套筒加工 .....                    | 444 | 7.3.2 滚子、套筒和销轴 .....          | 481        |
| 6.6.4 滚子加工 .....                    | 445 | 7.4 链条零件硬度 .....              | 486        |
| 6.7 输送用平顶链制造工艺 .....                | 445 | 7.5 链条零件渗层 .....              | 486        |
| 6.7.1 原材料的改制 .....                  | 445 | 7.6 链条零件金相组织 .....            | 487        |
| 6.7.2 链板加工 .....                    | 445 | 7.7 热处理质量缺陷分析 .....           | 489        |
| 6.7.3 销轴加工 .....                    | 448 | <b>第8章 链条零件渗金属技术 .....</b>    | <b>493</b> |
| 6.7.4 装配 .....                      | 450 | 8.1 渗金属技术 .....               | 493        |
| 6.8 模锻链制造工艺 .....                   | 451 | 8.1.1 渗金属技术特点 .....           | 493        |
| 6.9 焊接结构弯板链制造工艺 .....               | 453 | 8.1.2 渗金属过程 .....             | 493        |
| 6.9.1 原材料的改制 .....                  | 453 | 8.1.3 渗金属工艺方法 .....           | 493        |
| 6.9.2 链板加工 .....                    | 454 | 8.2 渗铬技术 .....                | 494        |
| 6.9.3 套筒加工 .....                    | 456 | 8.2.1 渗铬技术在链条行业中的<br>应用 ..... | 494        |
| 6.9.4 销轴加工 .....                    | 456 | 8.2.2 渗铬技术的材料选择 .....         | 495        |
| 6.9.5 链节焊接 .....                    | 457 | 8.2.3 渗铬工艺 .....              | 495        |
| 6.9.6 装配 .....                      | 458 | 8.2.4 影响渗铬层厚度的因素 .....        | 497        |
|                                     |     | 8.2.5 渗铬设备 .....              | 497        |

|                                    |     |                                            |     |
|------------------------------------|-----|--------------------------------------------|-----|
| 8.2.6 渗铬检测设备及仪器 .....              | 498 | 10.7.2 凸凹模尺寸计算公式 .....                     | 530 |
| 8.3 渗钒技术 .....                     | 498 | 10.8 模具闭合高度的确定 .....                       | 531 |
| 8.3.1 渗钒工艺特点 .....                 | 498 | 10.9 常见的模具结构 .....                         | 532 |
| 8.3.2 渗钒工艺理论 .....                 | 499 | 10.9.1 简单模具设计 .....                        | 532 |
| 8.3.3 渗钒工艺应用实例 .....               | 499 | 10.9.2 复合模具设计 .....                        | 537 |
| 8.4 其他表面硬化处理技术 .....               | 502 | 10.9.3 级进模具设计 .....                        | 540 |
| 8.4.1 渗硼技术 .....                   | 502 | 10.10 模具材料的选用 .....                        | 545 |
| 8.4.2 渗铝技术 .....                   | 503 | 10.10.1 模具工作零件常用材料的<br>基本特性 .....          | 545 |
| 8.4.3 TD (金属碳化物超硬覆层)<br>工艺 .....   | 504 | 10.10.2 模具工作零件材料的选用 .....                  | 546 |
| <b>第9章 链条强化工艺</b> .....            | 506 | 10.10.3 工艺零件和结构零件材料<br>的选用 .....           | 547 |
| 9.1 喷丸工艺 .....                     | 506 | 10.11 模锻模具设计 .....                         | 548 |
| 9.1.1 喷丸前零件的要求 .....               | 506 | 10.11.1 锻模设计 .....                         | 548 |
| 9.1.2 喷丸前的准备 .....                 | 507 | 10.11.2 切边与冲孔模设计 .....                     | 551 |
| 9.1.3 钢丸的要求与选择 .....               | 507 | 10.11.3 锻模的材料与热处理 .....                    | 552 |
| 9.1.4 零件喷丸的工艺参数 .....              | 507 | <b>第11章 链条产品质量检验技术</b> .....               | 553 |
| 9.1.5 覆盖率的确定 .....                 | 508 | 11.1 滚子链产品质量检验规范与检验<br>方法 .....            | 553 |
| 9.1.6 喷丸强度的确定 .....                | 509 | 11.1.1 精密滚子链 (套筒链) 检验<br>规则 .....          | 554 |
| 9.1.7 喷丸后处理一般原则 .....              | 510 | 11.1.2 精密滚子链 (套筒链) 检验<br>规则有关内容的说明 .....   | 558 |
| 9.2 挤孔工艺 .....                     | 512 | 11.1.3 精密滚子链 (套筒链) 检验<br>规则统计学应用原理 .....   | 561 |
| 9.2.1 基本原理 .....                   | 512 | 11.2 齿形链产品质量检验规范与检验<br>方法 .....            | 563 |
| 9.2.2 链板塑性区扩展与残余应力<br>的计算 .....    | 512 | 11.2.1 GB/T 10855—2003《齿形<br>链和链轮》 .....   | 563 |
| 9.2.3 主要挤孔参数的实例计算 .....            | 514 | 11.2.2 JB/T 10348—2013《摩托车<br>用齿形链条》 ..... | 564 |
| 9.2.4 应注意的几个问题 .....               | 515 | 11.3 链条产品中心距链长测量技术 .....                   | 565 |
| 9.3 预拉工艺 .....                     | 516 | 11.3.1 链长精度测量的一般要求 .....                   | 565 |
| 9.3.1 预拉分类 .....                   | 516 | 11.3.2 中心距链长测量原理 .....                     | 567 |
| 9.3.2 强化预拉处理能提高链条疲<br>劳强度的机理 ..... | 517 | 11.4 汽车链产品型式试验 .....                       | 569 |
| 9.3.3 预拉载荷及预拉时间 .....              | 520 | 11.4.1 正时链型式试验设备 .....                     | 569 |
| <b>第10章 链条模具设计</b> .....           | 522 | 11.4.2 正时链型式试验方法 .....                     | 570 |
| 10.1 链条冲压模具的设计步骤 .....             | 522 | 11.5 Hy-Vo 齿形链型式试验 .....                   | 571 |
| 10.2 链板模具结构形式的选择 .....             | 523 | 11.5.1 Hy-Vo 齿形链磨损机理 .....                 | 572 |
| 10.3 排样与搭边 .....                   | 524 | 11.5.2 Hy-Vo 齿形链型式试验设备<br>及方法 .....        | 572 |
| 10.3.1 排样 .....                    | 524 | 11.6 石油钻机传动滚子链型式试验 .....                   | 573 |
| 10.3.2 搭边与搭边值的确定 .....             | 524 | 11.7 滚子链产品可靠性检验方法 .....                    | 574 |
| 10.4 冲裁力的计算 .....                  | 525 |                                            |     |
| 10.5 模具压力中心的确定 .....               | 526 |                                            |     |
| 10.5.1 解析法 .....                   | 526 |                                            |     |
| 10.5.2 作图法 .....                   | 527 |                                            |     |
| 10.6 模具冲裁间隙的确定 .....               | 527 |                                            |     |
| 10.7 冲压模具凸凹模刃口尺寸计算 .....           | 529 |                                            |     |
| 10.7.1 凸凹模尺寸计算原则 .....             | 530 |                                            |     |

|                                                           |     |                                          |     |
|-----------------------------------------------------------|-----|------------------------------------------|-----|
| 11.7.1 滚子链疲劳可靠性评估方法 .....                                 | 575 | 13.2.7 大负变位的齿形链链轮齿根<br>过渡曲线的求解方法 .....   | 620 |
| 11.7.2 可靠寿命评定方法 .....                                     | 576 | <b>第 14 章 链轮加工刀具的设计</b> .....            | 623 |
| 11.7.3 正常载荷水平下的抽样<br>检验 .....                             | 576 | 14.1 盘形链轮铣刀 .....                        | 623 |
| 11.7.4 加速试验的抽样检验 .....                                    | 577 | 14.1.1 滚子链链轮铣刀的齿形<br>计算 .....            | 623 |
| <b>第 12 章 链条产品失效分析</b> .....                              | 579 | 14.1.2 盘形链轮铣刀的主要技术<br>条件 .....           | 628 |
| 12.1 疲劳断裂失效分析 .....                                       | 579 | 14.2 链轮滚刀 .....                          | 629 |
| 12.1.1 直线疲劳试验 .....                                       | 579 | 14.2.1 滚子链链轮滚刀设计 .....                   | 629 |
| 12.1.2 台架试验 .....                                         | 580 | 14.2.2 齿形链链轮滚刀设计 .....                   | 636 |
| 12.1.3 道路行驶试验 .....                                       | 581 | 14.2.3 链轮滚刀的技术要求 .....                   | 649 |
| 12.2 磨损失效分析 .....                                         | 582 | <b>第 15 章 汽车链传动系统设计</b> .....            | 651 |
| 12.2.1 磨损的分类 .....                                        | 582 | 15.1 汽车发动机正时链系统设计 .....                  | 651 |
| 12.2.2 滚子链磨损特性 .....                                      | 583 | 15.1.1 典型正时系统的设计优化 .....                 | 653 |
| 12.2.3 套筒链磨损特性 .....                                      | 586 | 15.1.2 基于 Solidworks 的典型正时<br>系统设计 ..... | 656 |
| 12.2.4 齿形链磨损特性 .....                                      | 590 | 15.1.3 正时系统试验技术 .....                    | 661 |
| 12.2.5 Hy-Vo 齿形链磨损特性 .....                                | 593 | 15.1.4 正时系统失效模式 .....                    | 663 |
| 12.3 冲击疲劳失效分析 .....                                       | 594 | 15.2 汽车变速器、分动箱传动链系统<br>设计 .....          | 665 |
| 12.3.1 滚子和套筒冲击疲劳 .....                                    | 594 | 15.2.1 齿形链传动在汽车变速器及<br>分动箱中的应用 .....     | 665 |
| 12.3.2 滚子断口微观分析 .....                                     | 595 | 15.2.2 混合动力汽车变速器链传动<br>系统设计 .....        | 666 |
| 12.3.3 提高滚子抗断裂失效能力的<br>途径 .....                           | 597 | 15.2.3 汽车分动箱链传动系统设计 .....                | 669 |
| 12.4 链条“散架”失效分析 .....                                     | 600 | 15.2.4 汽车变速器、分动箱链传动<br>系统失效分析 .....      | 671 |
| 12.4.1 松动转矩试验 .....                                       | 600 | <b>第 16 章 链传动仿真分析</b> .....              | 675 |
| 12.4.2 压出力和松动转矩试验 .....                                   | 602 | 16.1 链传动仿真分析概述 .....                     | 675 |
| 12.5 塑性变形失效分析 .....                                       | 603 | 16.2 链传动仿真分析流程 .....                     | 675 |
| 12.5.1 塑性变形失效定义 .....                                     | 603 | 16.3 双顶置发动机正时系统动态特性<br>仿真分析 .....        | 676 |
| 12.5.2 06BT 滚子链塑性变形失效<br>分析 .....                         | 603 | 16.3.1 链节运动轨迹分析 .....                    | 677 |
| <b>第 13 章 链轮齿形</b> .....                                  | 605 | 16.3.2 链节间张力分析 .....                     | 677 |
| 13.1 滚子链链轮齿形 .....                                        | 605 | 16.3.3 正时链系统中链节与各构<br>件间的接触力分析 .....     | 678 |
| 13.1.1 ISO 齿形 .....                                       | 605 | 16.4 V 型发动机正时链传动系统<br>分析 .....           | 679 |
| 13.1.2 三圆弧一直线齿形 .....                                     | 606 | 16.4.1 正时传动系统动态特性<br>分析 .....            | 679 |
| 13.1.3 渐开线齿形 .....                                        | 611 | 16.4.2 正时链的运动轨迹分析 .....                  | 680 |
| 13.2 齿形链链轮齿形 .....                                        | 612 |                                          |     |
| 13.2.1 渐开线的极坐标方程 .....                                    | 612 |                                          |     |
| 13.2.2 链轮基本参数 ( $z$ 、 $p_1$ 、 $m_1$ 、 $\alpha_1$ ) .....  | 613 |                                          |     |
| 13.2.3 链轮直径尺寸 ( $d$ 、 $d_a$ 、 $d_f$ ) .....               | 613 |                                          |     |
| 13.2.4 量柱测量距 $M_R$ 和量柱<br>直径 $d_R$ .....                  | 614 |                                          |     |
| 13.2.5 齿楔角 $2\alpha$ 、齿槽角 $\beta$ 和齿<br>形角 $\gamma$ ..... | 614 |                                          |     |
| 13.2.6 变位系数 $x$ 和公法线长度 $w$ .....                          | 615 |                                          |     |

|        |                                       |     |         |                                  |     |
|--------|---------------------------------------|-----|---------|----------------------------------|-----|
| 16.4.3 | 正时链的链节张力分析 .....                      | 681 | 18.1    | 润滑与摩擦的分类 .....                   | 739 |
| 16.4.4 | 正时主系统中正时链与传动<br>部件之间的接触力分析 .....      | 681 | 18.1.1  | 润滑的分类 .....                      | 739 |
| 16.4.5 | 正时链系统张紧器张紧力<br>分析 .....               | 682 | 18.1.2  | 摩擦的分类 .....                      | 740 |
| 16.5   | 齿形链系统仿真分析 .....                       | 683 | 18.2    | 链传动润滑方式 .....                    | 740 |
| 16.5.1 | 链条波动的理论分析 .....                       | 684 | 18.3    | 链传动润滑材料 .....                    | 743 |
| 16.5.2 | 某型发动机用正时齿形链系<br>统波动量仿真分析 .....        | 686 | 18.3.1  | 润滑剂的基本性质 .....                   | 743 |
| 16.5.3 | 某单顶置正时齿形链系统仿<br>真分析 .....             | 689 | 18.3.2  | 润滑油的黏度 .....                     | 743 |
| 16.5.4 | 齿形链的刚柔混合接触<br>分析 .....                | 693 | 18.3.3  | 润滑油的其他质量指标 .....                 | 745 |
| 16.6   | Hy-Vo 齿形链传动仿真分析 .....                 | 704 | 18.3.4  | 润滑油的 SAE 分级法 .....               | 745 |
| 16.6.1 | 传动系统虚拟样机模型 .....                      | 704 | 18.3.5  | 固体润滑剂的性能 .....                   | 746 |
| 16.6.2 | 传动系统仿真结果及分析 .....                     | 706 | 18.4    | 链传动的润滑 .....                     | 747 |
| 16.6.3 | 圆形基准孔 Hy-Vo 齿形链系<br>统的动态接触力分析 .....   | 709 | 18.4.1  | 传动用短节距精密滚子链和<br>套筒链的润滑 .....     | 747 |
| 第 17 章 | 链传动噪声分析 .....                         | 711 | 18.4.2  | 输送链的润滑 .....                     | 750 |
| 17.1   | 引言 .....                              | 711 | 18.4.3  | 齿形链传动的润滑 .....                   | 751 |
| 17.2   | 噪声分析基础理论 .....                        | 711 | 第 19 章  | 链条制造与检测试验<br>设备 .....            | 752 |
| 17.2.1 | 噪声的主要参数及意义 .....                      | 711 | 19.1    | 链条制造设备 .....                     | 752 |
| 17.2.2 | 噪声的测量方法 .....                         | 712 | 19.1.1  | 零件加工设备 .....                     | 752 |
| 17.2.3 | 噪声信号的处理分析 .....                       | 715 | 19.1.2  | 热处理设备 .....                      | 757 |
| 17.3   | 滚子链和新型 Hy-Vo 齿形链的噪<br>声测试试验 .....     | 716 | 19.1.3  | 链条组装机 .....                      | 762 |
| 17.4   | 滚子链和新型 Hy-Vo 齿形链的<br>噪声分析 .....       | 718 | 19.2    | 链条检测与试验设备 .....                  | 767 |
| 17.4.1 | 噪声分析仪器及软件 .....                       | 718 | 19.2.1  | 万能材料试验机 .....                    | 767 |
| 17.4.2 | 噪声测试结果及分析 .....                       | 718 | 19.2.2  | 链长测量仪 .....                      | 768 |
| 17.5   | 汽车发动机正时齿形链系统的<br>噪声分析 .....           | 724 | 19.2.3  | 链条中心距动态测量仪 .....                 | 769 |
| 17.5.1 | 试验设备及试验规范 .....                       | 724 | 19.2.4  | 直线疲劳试验机 .....                    | 770 |
| 17.5.2 | 汽车发动机正时齿形链系<br>统的噪声分析 .....           | 725 | 19.2.5  | 回转疲劳及耐磨性能试验<br>设备 .....          | 770 |
| 17.6   | 圆形基准孔 Hy-Vo 齿形链传动<br>系统噪声特性试验研究 ..... | 730 | 19.2.6  | 显微硬度计 .....                      | 771 |
| 17.6.1 | 试验系统及试验方案 .....                       | 730 | 19.2.7  | 光谱分析仪 .....                      | 772 |
| 17.6.2 | 噪声测试数据及测试结果<br>分析 .....               | 732 | 19.2.8  | 粗糙度轮廓仪 .....                     | 773 |
| 17.6.3 | 噪声测试试验误差原因分析 .....                    | 737 | 19.2.9  | 自动投影仪 .....                      | 773 |
| 17.6.4 | 噪声测试试验结论 .....                        | 738 | 19.2.10 | 轮廓自动扫描仪 .....                    | 774 |
| 第 18 章 | 链传动润滑技术 .....                         | 739 | 19.2.11 | 三坐标测量仪 .....                     | 774 |
|        |                                       |     | 19.2.12 | 多轴高速正时系统试验机 .....                | 775 |
|        |                                       |     | 19.2.13 | 噪声频谱检测仪 .....                    | 775 |
|        |                                       |     | 19.2.14 | 清洁度检测系统 .....                    | 775 |
|        |                                       |     | 19.2.15 | 盐雾试验机 .....                      | 777 |
|        |                                       |     | 附录 A    | 链传动国际标准、中国标<br>准和国外标准目录 .....    | 778 |
|        |                                       |     | A.1     | ISO /TC 100 国际链条链轮标准<br>目录 ..... | 778 |

|                                                                               |     |                                                                          |     |
|-------------------------------------------------------------------------------|-----|--------------------------------------------------------------------------|-----|
| A. 2 我国链传动产品及相关产品标准<br>目录 .....                                               | 779 | B. 9 曳引用焊接结构弯板链 .....                                                    | 835 |
| A. 3 美国链传动标准目录 .....                                                          | 783 | B. 10 倍速输送链 .....                                                        | 837 |
| A. 4 德国链传动标准目录 .....                                                          | 784 | B. 11 摩托车用齿形链条 .....                                                     | 838 |
| A. 5 日本链传动标准目录 .....                                                          | 786 | B. 12 链条压出力试验规范<br>(JB/T 10970—2010) 内容摘录 .....                          | 840 |
| A. 6 英国链条链轮标准目录 .....                                                         | 787 | B. 13 精密滚子链(套筒链)检验<br>规则(JB/T 11802—2014)<br>内容摘录 .....                  | 842 |
| <b>附录 B 相关链传动标准及规范</b><br><b>内容简介</b> .....                                   | 789 | B. 14 链条产品分类(JB/T 6368<br>—2010) 内容摘录 .....                              | 847 |
| B. 1 链条链轮术语(ISO 13203: 2005,<br>GB/T 9785—2007) 内容摘录 .....                    | 789 | <b>附录 C 黑色金属(碳钢及合金钢)</b><br><b>硬度及强度换算值</b><br>(摘自 GB/T 1172—1999) ..... | 850 |
| B. 2 传动用短节距精密滚子链、套筒<br>链的额定功率(ISO 10823: 2004,<br>GB/T 18150—2006) 内容简介 ..... | 803 | <b>附录 D 硬度对照表(参考资料)</b> .....                                            | 853 |
| B. 3 传动用短节距精密滚子链、套<br>筒链 .....                                                | 807 | <b>附录 E 链条产品常用材料中外钢号<br/>及化学成分对照表</b> .....                              | 854 |
| B. 4 齿形链和链轮(GB/T 10855—<br>2015) 内容简介 .....                                   | 811 | <b>附录 F 渐开线函数表</b> .....                                                 | 869 |
| B. 5 板式链 .....                                                                | 827 | <b>附录 G 与链传动产品设计和使用的<br/>相关的一些标准内容摘编</b> .....                           | 873 |
| B. 6 摩托车链条 .....                                                              | 832 | <b>参考文献</b> .....                                                        | 878 |
| B. 7 输送链 .....                                                                | 832 |                                                                          |     |
| B. 8 重载传动用弯板滚子链 .....                                                         | 834 |                                                                          |     |

# 第 1 章 链传动行业的技术研究现状与发展趋势

## 1.1 概述

链条是一种应用广泛的重要机械基础件，具有悠久的发展历史。文献记载表明，我国是链条制造和使用最早的国家之一，在宋代苏颂发明的“水运仪象台”上就安装使用了传递运动和动力的链条。近代链条基本结构的设想起源于欧洲文艺复兴时代的科学家和艺术家达·芬奇（Da Vinci），此后法国的伽尔和英国杰姆斯·司莱泰先后于 1832 年和 1864 年发明了销轴链和无套筒滚子链。由于这些链条结构不够合理、制造水平较低，因此使用寿命较短。1880 年英国的汉斯·雷诺（Hans Renold）发明了现代广泛流传的套筒滚子链，随后在 1885 年又发明了齿形链，此后套筒滚子链和齿形链成为链传动领域的两个主要发展方向，也为链传动的广泛应用奠定了基础。1886 年自行车上开始采用链传动，1889 年汽车上首次由法国巴那罗应用了链传动，1903 年链传动应用于美国怀特兄弟发明的飞机上，此后链传动的应用越来越广泛。

链传动是一种具有中间挠性件的非共轭啮合传动，它兼有齿轮传动和带传动的一些特点。链传动所能适应的工况相当广泛，特别是在大中心距、定速比、多轴传动的工况下，以及环境恶劣的开式传动、冲击振动大的传动、大载荷的低速传动、润滑良好的高速传动中，采用链传动将带来明显的技术效益与经济效益。

链传动传递功率达  $0.1 \sim 5000\text{kW}$ ，效率达 98%，传动比可达到 10 以上，线速度可高达  $45\text{m/s}$  以上；在正常传动工况下，对于短节距精密滚子链，其使用寿命可达 15000h。链传动现已广泛用于汽车、高速列车、摩托车、自行车、船舶、航空航天器械、军用车辆、机床、汽轮机、农业机械、林业机械、冶金机械、矿山机械、工程机械、起重运输机械、石油化工机械、建材机械、轻工机械、纺织机械、食品药品器械、办公机械、环保机械等众多行业。其品种、规格繁多，小到节距为 3.175mm、3.7465mm、4.0mm、4.7625mm 的套筒链，大到万吨级巨轮用的节距为 88.9mm 的传动滚子链，乃至大型输送机上用的节距长达 1m 的输送链和水电站大坝闸门上所用的最小抗拉强度高达 5005kN 的板式链。链条不但能满足大量的一般机械的需求，而且在满足特种需求方面，更是其他传动方式难以甚至无法替代的。

为了振兴我国的核心基础零部件行业，国家启动了“工业强基”的战略规划和实施计划，链传动行业已被正式列入国家优先资助和重点支持的领域。

新型齿形链和新型 Hy-Vo 齿形链系列产品及 CVT 无级变速器链系列产品是链传动产品中的高端产品。我国是汽车制造大国，2015 年乘用车（包括轿车、越野车、商务车、面包车等）产销量已达 2100 万辆，而作为汽车发动机的正时系统，近年来采用链传动的已越来越多。据不完全统计，目前采用齿形链传动的正时系统已上升至总量的 50% 以上；同时，汽车变速器、分动箱采用齿形链和 Hy-Vo 齿形链的也越来越多。

但是，以往国内对新型齿形链和新型 Hy-Vo 齿形链及 CVT 无级变速器链系列产品的研

发导向缺乏战略定位,且未形成“聚焦”效应;同时,由于当时的国产齿形链和 Hy-Vo 齿形链的性能与国外名牌产品尚有一定差距,因而国内的众多主机厂一直大量依赖高价进口齿形链和 Hy-Vo 齿形链系列产品。不仅价格较高,而且预付款时间较长,如果需要外方增加供应量,还要上调采购价格;同时,国外名牌产品经常采用变异技术的手段,给国内企业设置了开发齿形链和 Hy-Vo 齿形链系列产品的技术壁垒,即从两个方面形成了这种“卡脖子”的被动局面。目前,国内链条企业为国内汽车主机厂配套的齿形链和 Hy-Vo 齿形链产品,仅占全部份额的 5% 左右,其余均由国外高价进口。可以说,齿形链和 Hy-Vo 齿形链的市场目前仍主要由美国 BorgWarner( Morse)、日本 D. I. D、TSUBAKI、德国 IWIS 等公司主导与控制。

同时,军用车链、航空用齿形链系统、高速列车制动器链系统、舰艇动力传动装置、汽轮机传动装置、高速磨床传动装置、轧钢机传动装置、工业泵、叉车、摩托车等应用齿形链和 Hy-Vo 齿形链的也越来越多。目前,上述系统和装置也大多采用国外高价进口齿形链和 Hy-Vo 齿形链系列产品。

综上所述,仅国内市场对齿形链和 Hy-Vo 齿形链系列产品及 CVT 无级变速器链系列产品的需求空间已达近 80 亿元,同时国外市场也十分广阔。

随着汽车发动机技术的发展,汽车发动机曲轴链轮的转速通常高达 5000 ~ 8000r/min,有的甚至已超过 10000r/min(平衡轴链),其传动功率也远大于 ISO 10823:2004 链传动功率曲线所限定的传动功率,同时,汽车链系统的检验与试验规范也不同于普通链传动。可见,汽车链传动已突破了常规意义下的链传动领域。由于汽车链的高速、大载荷、低噪声、强磨损工况,以及速度与载荷的交变特性,从而使其啮合机理的研究、复杂约束边界条件下的刚柔体多轴传动系统的设计方法及其产品设计技术、制造技术、失效模式和分析等,构成了学科及行业的一个热点问题和重要的前沿研究领域。

特别应该指出的是,近年来许多重要的齿轮传动和带传动领域已逐渐被齿形链传动和 Hy-Vo 齿形链传动所取代,其中高精度和高性能新型齿形链、新型滚销式齿形链(Hy-Vo 齿形链)、CVT 无级变速器链等已成为行业内的核心基础零部件,故其应用前景非常广阔。

## 1.2 链传动技术研究现状

### 1.2.1 链传动行业技术创新能力全面提升

随着工业化、信息化、智能化的不断深入,链传动专业的技术也发展到了崭新的历史时期,其创新、变异、升级已成为其主要特征。

近年来,国内在链条的疲劳性能方面做了大量的测试研究工作,对于指导产品设计与制造无疑发挥了重要的作用。同时,也注意到了对链条的疲劳寿命分布规律的研究,利用如威布尔分布、对数正态分布等开展了滚子、套筒零件的大能量和小能量高速多次冲击疲劳破裂的微观分析研究。在学术和行业还积极开展了对汽车链、摩托车链等产品的直线疲劳、回转疲劳、高周疲劳、低周疲劳的理论研究和试验研究,并开始关注加载频率、加载波形对链条疲劳强度和疲劳寿命的影响特性。但限于经费等多种原因,这些研究工作不够深入和系统,如对疲劳断口的分析,特别是对疲劳断口的微观分析尚显不足;对疲劳断裂过程中裂纹萌

生、微观裂纹扩展、宏观裂纹扩展、断裂失效的机理及其动态过程了解不多。而断口的失效分析,对于检验和指导产品设计与制造工艺是至关重要的一环;当然,断口分析不应仅限于链板零件的疲劳断裂,也应包括滚子、套筒零件的小能量多冲疲劳破裂。建立典型的疲劳断口图谱则是行业内一个重要的基础工作。

磨损机制及其失效机理的研究对于打造名牌链条产品是至关重要的,磨损历来是链条产品最敏感而又最易察觉到的技术指标之一,且链条磨损性能的测试研究在国内已有一定的工作基础。近年来,国内已经开始了滚子链、齿形链和 Hy-Vo 齿形链磨损失效机理的研究,微观分析了磨粒磨损、疲劳磨损、黏着磨损、微动磨损、腐蚀磨损等主要磨损机制,探讨了接触疲劳裂纹的生成、扩展与剥落的动态过程及循环硬化与循环软化特性。研究了微动磨损与链节连接牢固度(压出力、松动扭矩)动态特性的相关性,探讨与分析了滚子链磨损可靠性抽样检验的理论与方法。随着市场对链条产品耐磨性能的要求不断提高( $\varepsilon \leq 1\%$ ),全面系统地研究滚子链、套筒链、齿形链等众多产品的磨损特性势在必行。作为一种技术发展趋势,开展高速、冲击、变速、变载、粉尘、腐蚀等严酷服役条件下的磨损机制及其失效机理的研究,并探寻耐磨性提高的重要途径将是一个具有实用价值的关键技术和创新工程。

对于高速链传动噪声指标的重要性,行业内已早有认识,但相应的研究与测试工作进展缓慢。究其原因,首先是行业内没有相关的标准和检验规范,而要提出链传动噪声的评价指标和测试方法,没有坚实的前期研究基础为支撑也是很难实现的;其次是严格的噪声测试环境和测试条件也限制了这方面工作的开展。当前,已有不少链条产品,如汽车发动机正时链、机油泵链、变速器 Hy-Vo 齿形链、摩托车发动机正时链等已逐渐引入了噪声评价指标,从而拉动了行业应对这一市场需求的技术策略的产生。应该指出,噪声的研究与测试不能仅限于链传动系统的瞬时噪声值,而是应该对链传动系统的瞬态信号或非稳态信号的噪声频谱进行实时分析,研究其噪声的频率-时间的动态特性,寻求产生噪声的根源和降低噪声的措施,从而在此基础上提出相关的评价标准和检验规范,而这一研究工作首先由 Hy-Vo 齿形链传动起步,将具有重要的指导意义。目前,汽车发动机正时链系统的噪声频谱实时分析与研究工作已经取得了许多重要的研究成果。

对于链条产品的温度场特性,国内已开始由 Hy-Vo 链、水泥链入手,利用非接触式红外测温仪系统,现场实时跟踪测量了齿形链、Hy-Vo 齿形链、水泥链等的温度场特性,并同步拍摄了相关照片,计算求出了齿形链、Hy-Vo 齿形链、水泥链等各零件的温度分布曲线,从而为齿形链、Hy-Vo 齿形链、水泥链、冶金链等在较高温度场下服役的链条产品的设计和制造提供了重要依据。

### 1.2.2 链传动行业新产品、新技术、新理论不断问世

近年来,随着市场需求的变化,链条产品系列呈现了多元化趋势,在普通型、加重型的基础上,派生出一系列轻窄型产品,变异出带 O 形圈和 X 形圈的系列产品,成功研发了汽车发动机正时链、机油泵链、燃油泵链、共轨泵链、平衡轴链、变速器和分动箱齿形链和 Hy-Vo 链及其系统、航空链、军用车链等新产品,实现了相关产品国产化的预期;链条节距除向大、小节距两端延伸外,还在小节距范围内插入了新的标准或非标准的节距,使小节距分布更密,更适用于不同工况的传动,体现了个性化特征;在尺寸相同的条件下,派生出了一系列不同疲劳强度、拉伸强度、磨损性能的变异产品;在服役工况方面,出现了耐高