

# 轿车混合动力链传动系统设计及高速特性

程亚兵<sup>1</sup>, 王 洋<sup>1</sup>, 齐洪刚<sup>2</sup>, 付振明<sup>3</sup>

(1. 吉林大学 机械科学与工程学院, 吉林 长春 130022;

2. 中国第一汽车股份有限公司 技术中心, 吉林 长春 130011; 3. 青岛征和工业有限公司, 山东 青岛 266705)

**摘 要:** 对混合动力 Hy-Vo 齿形链系统进行理论啮合设计, 结合设计实例完成轿车混合动力 Hy-Vo 齿形链参数计算以及传动系统布局设计, 并在磨损试验台上进行高速磨损试验, 绘制 Hy-Vo 齿形链磨损曲线, 并对磨损部位进行微观扫描分析。微观形貌分析结果表明, 由于 Hy-Vo 齿形链通过对滚销轴交替承载磨损, 有效降低了承载表面比压值, 使得 Hy-Vo 齿形链具有较高的耐磨性, 在高速多冲条件下, 轿车混合动力用链的磨损机制为疲劳磨损、磨粒磨损以及微动磨损。提高链条的制造精度并严格保证装配精度对于延长链条的使用寿命具有重大的现实意义。

**关 键 词:** 混合动力; Hy-Vo 齿形链; 啮合设计; 磨损试验; 磨损机制; 微观形貌

**中图分类号:** TH 132.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2016)01-0143-05

## Design and High-Speed Characteristics of Automotive Hybrid Chain System

CHENG Ya-bing<sup>1</sup>, WANG Yang<sup>1</sup>, QI Hong-gang<sup>2</sup>, FU Zhen-ming<sup>3</sup>

(1. School of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China; 2. R & D Center, China FAW Co., Ltd., Changchun 130011, China; 3. Qingdao CHOHO Industry Limited Company, Qingdao 266705, China. Corresponding author: CHENG Ya-bing, E-mail: chengyb@jlu.edu.cn)

**Abstract:** The theoretic meshing of hybrid Hy-Vo silent chain system was designed. Based on design projects, the parameters were calculated and the transmission system was arranged. The wear test was performed to gain the wear curve of the novel Hy-Vo silent chain and the microscopic scanning of the wearing terrain. The results indicated that the special-shaped pin of the Hy-Vo chain can bear the load with rolling friction alternatively, and the bearing surface pressure of Hy-Vo chain is lower, resulting in a higher wear resistant property. The wear mechanism synthesizes fatigue wear, abrasive wear and fretting wear. The service life of automotive hybrid Hy-Vo chain system can be improved by enhancing the precision of fabrication and assembly.

**Key words:** hybrid power; Hy-Vo silent chain; meshing design; wear test; wear mechanism; microtopography

混合动力汽车的动力系统包括多种动力源, 一般多是内燃机和电动机两种, 因此混合动力汽车兼并了发动机和电动机两种动力的优点。具有尾气排放少、燃油效率高、加速良好、运行安静等优点, 在混合动力构型中, 电机与变速箱平行布置的型式, 节油效果能够达到 35% 以上, 成为轿车混合动力的主要开发型式<sup>[1-2]</sup>。

本文研究的轿车混合动力用 Hy-Vo 齿形

链, 具有变节距和内-外复合啮合的双重效用, 特别适用于在高速、变速、变载的工况, 实现混合动力构型中电动机和变速箱之间的动力传递<sup>[3]</sup>。在完成了 Hy-Vo 齿形链的参数计算之后, 若干节内啮合链节+若干节外啮合链节依次交替连接, 最后首尾铆接而成, 通过对电机轴链轮和变速箱轴链轮进行围链, 从而完成混合动力用 Hy-Vo 齿形链磨损试验传动系统的布置。

收稿日期: 2014-05-16

基金项目: 吉林省科技发展计划项目(20116004); 国家自然科学基金资助项目(51305154)。

作者简介: 程亚兵(1979-), 女, 河南襄城人, 吉林大学副教授。

本文对混合动力 Hy-Vo 齿形链系统进行理论啮合设计, 结合具体实例完成轿车混合动力 Hy-Vo 齿形链参数计算以及传动系统布局设计, 并在磨损试验台上进行高速磨损试验, 绘制 Hy-Vo 齿形链磨损曲线, 并对磨损部位进行微观扫描分析. 通过对混合动力用 Hy-Vo 齿形链进行磨损试验, 分析其磨损特性, 并通过对链板、销轴进行微观形貌分析, 研究其磨损机制, 从而为我国汽车链传动系统的设计研究提供切实可行的技术支撑, 实验结果进一步验证了根据混合动力 Hy-Vo 齿形链理论设计方法所设计的 Hy-Vo 齿形链符合轿车混合动力传动系统对 Hy-Vo 齿形链的要求.

## 1 混合动力用 Hy-Vo 齿形链啮合设计

### 1.1 混合动力 Hy-Vo 齿形链设计

在混合动力 Hy-Vo 齿形链拉直状态时建立坐标系, 如图 1 所示, 定义  $P$  为混合动力 Hy-Vo 齿形链的基本节距,  $\alpha$  为工作链板的齿形角,  $A$  为工作链板孔基准圆的圆心距,  $f$  为工作链板的基准边心距,  $\gamma$  为定位偏置角,  $r$  为销轴大端表面的曲率半径,  $S_m$  为链板孔基准圆圆心至异型销轴大端表面的距离,  $\delta$  为内啮合链板内侧工作齿廓伸出量.

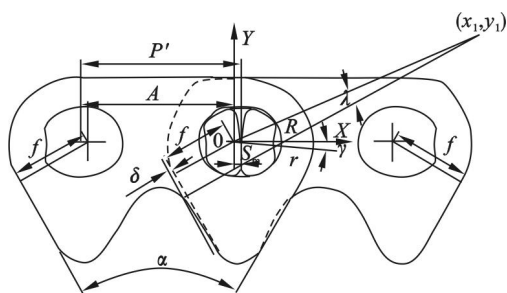


图 1 Hy-Vo 齿形链工作链板拉直状态  
Fig. 1 The straighten state of the novel Hy-Vo silent chain

拉直状态时其节距<sup>[4]</sup>变为

$$P' = A + 2[(r + S_m) \cos \gamma - r]. \quad (1)$$

取内啮合工作链板内侧工作齿廓曲率为  $R$ , 内侧工作齿廓曲率中心的坐标为

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= \frac{(R - f' - \delta) \sin(\lambda + 60^\circ)}{\cos \lambda} \\ y_1 &= \frac{(R - f' - \delta) \cos(\lambda + 60^\circ)}{\cos \lambda} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

其中,  $f' = f - (P' - A) \cos \alpha$ .

### 1.2 混合动力链轮设计

在混合动力传动系统运行的过程中, 将混合动力 Hy-Vo 齿形链板与链轮的啮合视为直线齿廓的齿条刀具和链轮的啮合. 齿条刀具进行变位时以刀具的分度线与链轮的分度圆相切作为加工基准, 从而建立混合动力 Hy-Vo 齿形链-链轮-刀具齿条的设计体系. 以链轮中心为坐标原点, 链轮轮齿的对称中心线为纵坐标, 过链轮的中心且垂直链轮轮齿对称中心线的水平直线为横坐标建立坐标系, 如图 2 所示.

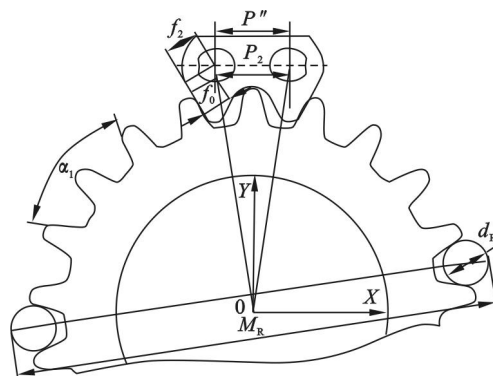


图 2 Hy-Vo 齿形链-链轮-刀具齿条设计体系  
Fig. 2 The design system of the new Hy-Vo silent chain-sprocket-hob

定义  $P_1$  为直线齿链轮节距,  $\alpha_1$  为齿楔角,  $P_2$  为刀具节距,  $\alpha_2$  为刀具齿形角,  $d_R$  为量柱直径, 选取链轮齿数为  $z$ , 则直线齿链轮分度圆直径  $d = P_1 / \sin \frac{\pi}{z}$ .

当 Hy-Vo 齿形链转过  $2\theta = 2\pi/z$  时, 节距<sup>[4]</sup>为

$$P'' = A + 2 \left[ \frac{(r + S_m) \cos(\theta - \gamma) - r}{\cos \theta} \right]. \quad (3)$$

边心距<sup>[4]</sup>变为

$$f_2 = f - \left[ \frac{(r + S_m) \cos(\theta - \gamma) - r}{\cos \theta} \right] \cos \alpha. \quad (4)$$

初始边心距<sup>[4]</sup>为

$$f_0 = f_2 - \left( \cot \frac{\pi}{z} - \sqrt{3} \right) (P'' - P_2) / 4. \quad (5)$$

从而可得出刀具的变位系数<sup>[4]</sup>为

$$x = \frac{\pi \cot \alpha_2}{4} - \frac{\pi}{2 \sin(\pi/z)} + \frac{\pi}{2 \tan(\pi/z)} - \frac{\pi f_0}{P_2 \sin \alpha_2}. \quad (6)$$

链轮的量柱测量距<sup>[4]</sup>为

$$M_R = \frac{P''}{2 \sin(90/z)} - \frac{2f_2 - d_R}{\sin(90/z) \left( \cot \frac{\pi}{z} - \sqrt{3} \right)} + d_R. \quad (7)$$

## 2 混合动力 Hy-Vo 齿形链设计实例

选取混合动力 Hy-Vo 齿形链的基本节距  $P=9.525\text{ mm}$ , 工作链板的齿形角  $\alpha=30^\circ$ , 工作链板孔基准圆的圆心距  $A=8.75\text{ mm}$ , 链板的基准边心距  $f=4.68\text{ mm}$ , 定位偏置角  $\gamma=5^\circ$ , 销轴大端表面的曲率半径  $r=7.5\text{ mm}$ , 链板孔基准圆圆心至异型销轴大端表面的距离  $S_m=0.42\text{ mm}$ , 根据式(1)可求得:  $P'=A+2[(r+S_m)\cos\gamma-r]=9.5297\text{ mm}$ .

令伸出量  $\delta=0.10\sim0.30\text{ mm}$ , 取内啮合工作链板内侧工作齿廓曲率为  $R=93\text{ mm}$ ,  $\lambda=1.6^\circ$ , 根据式(2)求得内侧工作齿廓曲率中心的坐标为  $x_1=78.08$ ,  $y_1=42.28$ .

选取直线链轮节距  $P_1=9.525\text{ mm}$ , 齿楔角  $\alpha_1=60^\circ$ , 刀具节距  $P_2=9.525\text{ mm}$ , 刀具齿形角  $\alpha_2=\alpha=30^\circ$ , 量柱直径  $d_R=6\text{ mm}$ .

当链轮齿数  $z=21$  时, 根据式(3)求得节距

$$P''=A+2\left[\frac{(r+S_m)\cos(\theta-\gamma)-r}{\cos\theta}\right]=9.5684\text{ mm}.$$

根据式(4)求得边心距

$$f_2=f-\left[\frac{(r+S_m)\cos(\theta-\gamma)-r}{\cos\theta}\right]\cos\alpha=$$

4.3856 mm.

根据式(5)求得初始边心距:

$$f_0=f_2-\left(\cot\frac{\pi}{z}-\sqrt{3}\right)(P''-P_2)/4=$$

4.3324 mm.

根据式(6)求得刀具的变位系数:

$$x=\frac{\pi\cot\alpha_2}{4}-\frac{\pi}{2\sin(\pi/z)}+\frac{\pi}{2\tan(\pi/z)}-\frac{\pi f_0}{P_2\sin\alpha_2}=-1.62.$$

根据公式(7)求得链轮的量柱测量距:

$$M_R=\frac{P''}{2\sin(90/z)}-\frac{2f_2-d_R}{\sin(90/z)\left(\cot\frac{\pi}{z}-\sqrt{3}\right)}+d_R=$$

62.456 mm.

当链轮齿数  $z=25$  时, 同理求得  $x=-1.57$ ,

$M_R=75.224$ .

## 3 混合动力 Hy-Vo 齿形链系统磨损试验

### 3.1 混合动力 Hy-Vo 齿形链系统布局设计

根据上述混合动力 Hy-Vo 齿形链设计实

例, 选择电机轴链轮齿数  $z_1=21$ , 轮齿朝上, 变速箱轴链轮齿数  $z_2=25$ , 齿槽朝上建立模型, 链条节数  $L_p=74$  节, 上边及下边分别为 26 个链节长, 在试验张紧力的作用下, 链条上下两边都为紧边, 见图 3.

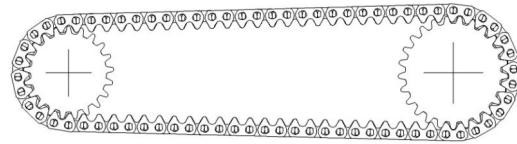


图 3 混合动力链传动系统布局设计

Fig. 3 The drive system of the novel Hy-Vo silent chain

### 3.2 混合动力 Hy-Vo 齿形链磨损试验方法

磨损试验设备是 3MME 磨损试验机, 在力流式链条高速试验台上进行, 如图 4 所示, 试验过程中电机轴链轮的转速为  $n=5000\text{ r/min}$ , 功率  $P=8.37\text{ kW}$ , 链条的单边张力  $F=500\text{ N}$ , 试验的样品数量为 2 条, 润滑条件为喷油润滑. 试验时间为 300 h, 开始试验 13.5 h 后进行第一次测量, 以后每隔 23.5 h 进行一次测量.

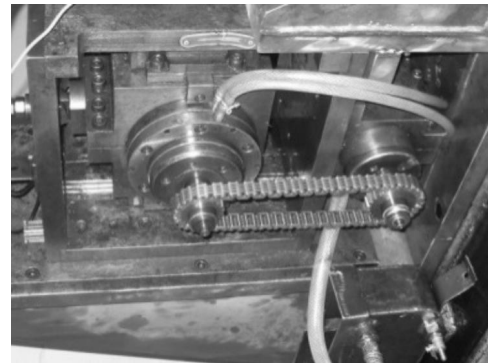


图 4 新型 Hy-Vo 齿形链高速磨损试验台

Fig. 4 The high-speed wear test rig of the new Hy-Vo silent chain

## 4 试验结果分析

### 4.1 Hy-Vo 齿形链的磨损曲线

由试验所测量的数据计算出中心距伸长量  $\Delta=a-a_0$ ,  $a$  为试验中测量的实际中心距,  $a_0$  为初始中心距, 在本试验中  $a_0=233.720\text{ mm}$ , 得到如图 5 所示试验时间与中心距伸长量的曲线关系图, 从图中可以看出 Hy-Vo 齿形链在经过 300 h 的高速磨损试验后, 中心距伸长量  $\Delta=0.760\text{ mm}$ .

在评价链条磨损性能时需计算磨损伸长率  $\varepsilon$ , 本文中采用“中心距-链长”<sup>[5]</sup>的方法求  $\varepsilon$ , 称为中心距磨损伸长率, 即  $\varepsilon=\frac{\Delta}{a_0}\times 100\%$ , 通过对得到的试验数据进行分析从而绘出混合动



力用 Hy - Vo 齿形链在正常磨损过程中的中心距磨损伸长率  $\varepsilon$  与工作时间  $t$  的关系曲线,见图 6。

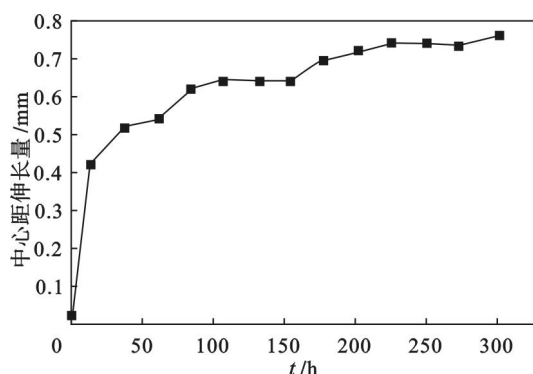


图 5 Hy - Vo 齿形链中心距伸长量曲线

Fig. 5 The center distance elongation curve of the new Hy-Vo silent chain

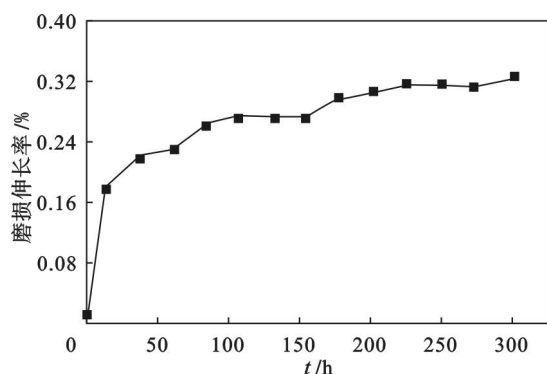


图 6 新型 Hy - Vo 齿形链磨损伸长率曲线

Fig. 6 The wear elongation curve of the new Hy-Vo silent chain

从图 5 和图 6 可以看出,0 ~ 50 h 显示的是初期磨损阶段,该曲线的斜率较大,这主要和齿形链的制造过程中留下的毛刺和装配空隙有关。曲线中的 100 ~ 150 h 和 225 ~ 275 h 两段时间内磨损伸长量几乎没有变化,这期间磨损仍然在进行,只是异型销轴和链板在磨损试验的进行中存在疲劳裂纹的生成,但碎屑还没有剥落,产生了没有磨损的假象。此外,在 300 h 的磨损试验中,总的中心距磨损伸长率  $\varepsilon = 0.325\%$ ,显示了 Hy - Vo 齿形链的较高的耐磨特性,而 0 ~ 50 h 的磨损初期伸长量占 70% 左右,而 50 ~ 300 h 期间磨损量占 30% 左右,由此可知提高链条的制造精度并严格保证装配精度对于提高链条的使用寿命具有重大的现实意义<sup>[6]</sup>。

#### 4.2 Hy - Vo 齿形链的磨损形貌

利用 XL30W/TMP 扫描电子显微镜分别对 Hy - Vo 齿形链链板、异型销轴的磨损光亮位置进行微观扫描分析,其中,链板材料为 50CrVA,异型销轴材料为 20CrNiMo。

由图 7 和图 8 可看出,内啮合链板的内侧外

凸曲线齿廓与外啮合链板的外侧直线齿廓均出现剥落坑,即点蚀,其磨损机制主要为疲劳磨损。在高速传动过程中,Hy - Vo 齿形链链板与链轮在接触表面产生相对滑动,使得链板与链轮接触处产生较大的循环应力,并发生塑性变形,从而在 Hy - Vo 齿形链链板与链轮接触位置造成点蚀。从图 7,图 8 的对比中可以看出,内啮合链板的内侧外凸曲线齿廓磨损比较严重,因而在传动过程中内啮合链板受到的力较大,承担了系统的大部分载荷,为提高内啮合链板的硬度,应对其进行特殊的强化处理<sup>[7-8]</sup>。

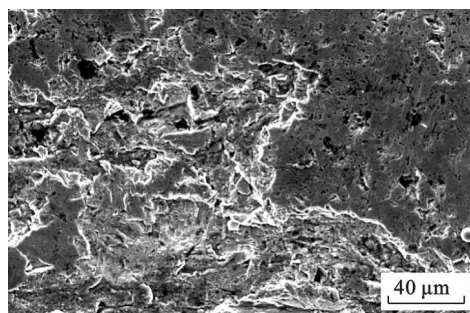


图 7 内啮合链板的内侧外凸曲线齿廓磨损形貌

Fig. 7 The wear appearance of the inner meshing link joint inside flank

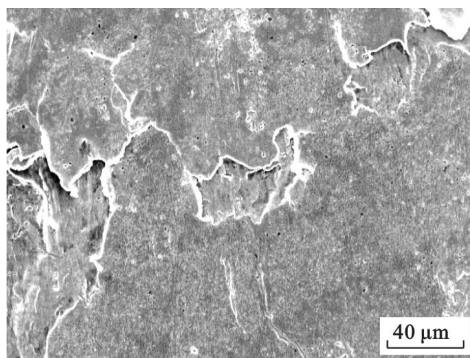


图 8 外啮合链板的外侧直线齿廓磨损形貌

Fig. 8 The wear appearance of the outer meshing link joint outside flank

由图 9 可以看出,在两个对滚异型销轴工作曲面上出现了与摩擦方向一致的沟槽,即犁切现象,工作曲面上伴随着剥落坑,从而说明异型销轴的磨损机制主要为磨粒磨损和疲劳磨损。对滚异型销轴在接触面产生高应力的冲击,在接触表面形成磨粒,磨粒受到的力可分解为垂直表面和平行表面的力<sup>[9-10]</sup>,垂直的分力将使磨粒压入异型销轴的接触面内,平行分力使磨粒在接触面做切向运行,从而引起异型销轴工作曲面的切变形和断裂。

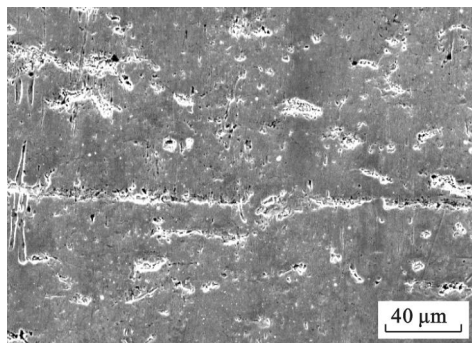


图 9 对滚异形销轴大端工作曲面的磨损形貌  
Fig. 9 The main surface wear morphology of the special-shaped pin

由图 10 和图 11 显示的磨损形貌可以看出, 对滚异型销轴与链板孔的定位接触部位发生微动磨损, 起初异型销轴与链板孔接触部位发生小振幅的相对运动, 间隙增大, 这有利于润滑油的进入和油膜的形成, 并且能起到良好的散热作用, 随着磨损的加剧, 可能导致 Hy - Vo 齿形链松动、功率损耗以及噪声增大<sup>[11]</sup>。

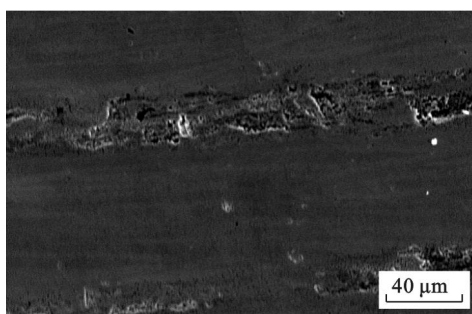


图 10 链板孔定位接触部位的磨损形貌  
Fig. 10 The wear appearance of the link joint hole

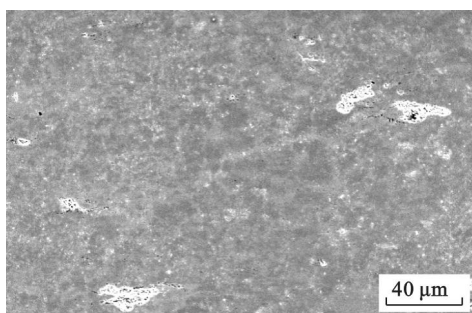


图 11 对滚异形销轴圆弧定位面的磨损形貌  
Fig. 11 The circular arc locating surface's wear appearance of special-shaped pin

## 5 结 论

1) 通过建立混合动力 Hy - Vo 齿形链 - 链轮 - 刀具齿条三者之间的啮合设计体系, 实现 Hy - Vo 齿形链与链轮的正确啮合传动, 满足轿车混合动力传动系统中电机轴与变速箱轴的耦合传

动。

2) 由 Hy - Vo 齿形链的磨损曲线可以得出: Hy - Vo 齿形链及链轮具有良好的耐磨特性, 根据 Hy - Vo 齿形链啮合理论所设计的 Hy - Vo 齿形链符合轿车混合动力传动系统对链条高转速、强耐磨的要求。

3) 在混合动力 Hy - Vo 齿形链高速传动过程中, 磨损机制主要有疲劳磨损、磨粒磨损以及微动磨损, 内啮合链板承受的循环应力较大, 提高链条的制造精度并严格保证装配精度对于提高链条的使用寿命具有重大的现实意义。

## 参考文献:

- [1] Zhang J L, Yin C L, Zhang J W. Design and analysis of electro-mechanical hybrid anti-lock braking system for hybrid electric vehicle utilizing motor regenerative braking [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition)*, 2009, 22(1): 42 - 49.
- [2] Stephenson R, Glennie D, Fawcett J N, et al. A method of measuring the dynamic loads in high-speed timing chains [J]. *Journal of Automobile Engineering*, 2000, 214(2): 217 - 226.
- [3] Meng F Z, Zhang J P, Huang M, et al. Research on wear characteristics of automotive engine chains under multi-cycle impact [J]. *Tribology*, 2007, 27(6): 573 - 577.
- [4] 孟繁忠. 齿形链啮合原理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2008: 35 - 44.  
(Meng Fan-zhong. The theoretic meshing of silent chain [M]. Beijing: China Machine Press, 2008: 35 - 44.)
- [5] Meng F, Liu X, Xu S. Meshing analysis and design of rotundity-datum-aperture Hy-Vo silent chain [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2008, 222(7): 1297 - 1303.
- [6] 王淑坤, 孟繁忠, 徐秀琴, 等. 汽车发动机滚子链的疲劳可靠性试验研究 [J]. *中国机械工程学报*, 2009, 20(21): 2642 - 2645.  
(Wang Shu-kun, Meng Fan-zhong, Xu Xiu-qin, et al. Fatigue reliability test study of automobile engine roller chain [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 20(21): 2642 - 2645.)
- [7] Meng F Z, Li C, Cheng Y B. Proper conditions of meshing for Hy-Vo silent chain and sprocket [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2007, 20(4): 57 - 59.
- [8] Meng F Z, Wang S K, Lan H, et al. Wear failure mechanism and multi-impact property of automotive engine chain [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2005, 18(3): 401 - 404.
- [9] Cheng Y B, Meng F Z, Xu H X, et al. Experiment study on high-speed characteristics of automotive engine oil-pump chain [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2007, 20(1): 36 - 39.
- [10] 郑林庆. 摩擦学原理 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1994: 317 - 364.  
(Zheng Lin-qing. Principles of tribology [M]. Beijing: Higher Education Press, 1994: 317 - 364.)
- [11] Meng F Z, Feng Z M, Chu Y X. Meshing theory and design method of new silent chain and sprocket [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition)*, 2006, 19(3): 425 - 427.