

# 大功率海洋装备发动机链条设计与试验\*

李存志<sup>①</sup> 付振明<sup>①</sup> 于资江<sup>①</sup> 王桂斌<sup>①</sup> 刘毅<sup>①</sup> 刘国梁<sup>②</sup>

(<sup>①</sup>青岛征和工业股份有限公司, 山东 青岛 266705;

<sup>②</sup>青岛理工大学机械与汽车工程学院, 山东 青岛 266520)

**摘要:** 针对大功率海洋装备发动机传动系统高疲劳性能及高耐磨性能的要求, 结合啮合特征及受力分析对滚子链的销轴、套筒零部件进行了结构创新设计, 并对热处理工艺进行了优化改进。对改进前后的链条进行硬度、耐磨性及抗疲劳性能测试的结果表明, 改进后链条的销轴表面硬度可达 800 HV<sub>0.2</sub> 以上、内单节压铆力降低了 24.7%、链条经 150 h 磨损测试后伸长率降低了 9%, 链条疲劳寿命全部满足要求。最后, 将改进后的链条装载到大功率海洋船舶发动机中, 进行了 2 000 h 的航海试验, 证明了改进后的链条可以满足大功率船用发动机正时链条的要求。该研究突破了我国海洋装备发动机链传动领域的技术难题, 使我国成为全球第三个具备大功率海洋装备发动机传动链条生产能力的国家, 并为高端制造业中的技术创新提供了宝贵经验。

**关键词:** 大功率海洋装备; 发动机链条; 结构设计; 航海试验

**中图分类号:** TP23      **文献标识码:** B

**DOI:** 10.19287/j.mtmt.1005-2402.2024.07.004

## Design and test of high-power marine equipment engines chain

LI Cunzhi<sup>①</sup>, FU Zhenming<sup>①</sup>, YU Zijiang<sup>①</sup>, WANG Guibin<sup>①</sup>, LIU Yi<sup>①</sup>, LIU Guoliang<sup>②</sup>

(<sup>①</sup>Qingdao CHOHO Industrial Co., Ltd., Qingdao 266705, CHN; <sup>②</sup>School of Mechanical and Automotive Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, CHN)

**Abstract:** Aiming at the requirements of high fatigue and wear-resistant performance of engine transmission for high-power marine equipment, the structural innovation design of the pin and sleeve parts of the roller chain was carried out by combining with the meshing characteristics and force analysis. The heat treatment process was also optimized. The hardness, wear-resistance and fatigue life tests showed that the surface hardness of the produced pin can be more than 800 HV<sub>0.2</sub>, the pressure riveting force of the inner single section was reduced by 24.7%, and the elongation of the chain was reduced by 9% in the wear test of 150 h. Finally, a 2 000 h sea trial was conducted by loading the developed chain into a high-power marine ship engine, and the results proved that the newly developed chain can meet the requirement of the high-power marine ship engine. This research breaks through the technical difficulties in the field of China's marine equipment engines, making China the third country in the world with the production capacity of high-power marine equipment engine transmission chains, and providing valuable experience for the technological innovation in manufacturing industry.

**Keywords:** high-power marine equipment; chain; structural design; sea trial

高端装备制造业是实现“中国制造”向“中国创造”的重要突破口, 也是提高国际竞争力的关键<sup>[1-2]</sup>。近年来, 海洋经济的重要性得到了越来越多的关注, “坚持陆海统筹, 加快建设海洋强国”

已经成为党的重要发展战略<sup>[3]</sup>。在此背景下, 我国海洋装备产业进入了发展的快车道, 对大规模海洋装备链条的需求也急剧提升。目前, 大规模海洋装备传动链条主要采用高强度、高可靠性的滚子链条,

\* 国家自然科学基金(52005281)

这种链条具有传动平顺、噪音低和可靠性高等特点，适用于重载、高速传动。但是，该链条技术长期被一些发达国家所垄断，是我国高端大功率海洋装备发展的瓶颈之一，因此研发并实现国产化是亟待解决的问题<sup>[4]</sup>。

近年来，青岛征和公司在国家工业强基工程项目的支持下，成功研发了一系列舰船用发动机链传动产品，打破了国际垄断。但是，真正实现大功率海洋装备链条的全面国产化，进一步提高链传动系统的传动效率、平稳性和可靠性等还需进一步研究。

为了解决大功率船用发动机滚子链传动中存在的多边形效应问题，Pedersen S L 通过将仿真结果与解析结果进行比较，得到了一个简化模型<sup>[5]</sup>。为了改善大功率链条的工艺，郭晓霞团队在河钢集团开展了研究工作。通过制定冶炼、轧制和退火工艺，成功地开发出适用于链条的高强度钢材，为高强度链条的制造提供了材料支撑<sup>[6]</sup>。然而，当前研究中，针对大功率海洋装备链条耐磨性能和抗疲劳性能提升的结构优化设计、热处理工艺改进等研究仍存在不足，需要进一步的研究。

### 1 链条的啮合及受力分析

链条传动系统在二冲程发动机中主要用于将曲轴的扭矩传递到驱动轮上，从而带动整个发动机的运转。在传动过程中，由于链条的节距大于链轮的节距，落入链轮齿沟底部的铰链必须沿着齿的工作面向上爬升，直到链节被张紧为止，即完成链条基本啮合过程<sup>[7]</sup>。

铰链磨损主要发生在主动边啮合开始时。当内链节啮合时，根据力系简化和力线平移法则，取链轮圆心为坐标原点<sup>[8]</sup>，则内链节受力如图1所示。

$$\begin{cases} -P_1 \sin(\beta + \varphi) + P_1 f \cos(\beta + \varphi) - N f_1 + S_1 \cos(\alpha + \varphi) = 0 \\ -P_1 \cos(\beta + \varphi) + P_1 f \sin(\beta + \varphi) + N + S_1 \cos(\alpha + \varphi) = 0 \\ N f_1 \frac{d_1}{2} + S_1 f \frac{d}{2} - P_1 h - P_1 f \left( \frac{d}{2} + P \right) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中： $P_1$ 为销轴接触部分正压力，N； $f$ 为套筒与销轴的摩擦系数； $S_1$ 为链节张力，N； $N$ 为法向作用力，N； $f_1$ 为套筒与滚子的摩擦系数； $d$ 为套筒直径，mm； $d_1$ 为销轴直径，mm； $P$ 为链条节距，mm； $\alpha$ 为分度角，deg； $\beta$ 为压力角，deg； $\varphi$ 为齿形角，deg。

将摩擦简化，令 $f_1=f$ 并代入式(1)得

$$\begin{cases} S_1 = P_1 \frac{\sin(\beta + \varphi)}{\sin(\alpha + \varphi)} \\ N = P_1 \frac{\sin(\alpha - \beta)}{\sin(\alpha + \beta)} \end{cases} \quad (2)$$

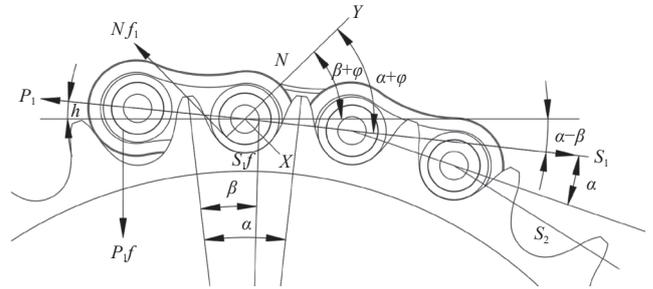


图1 内链节啮合时铰链的受力情况

当外链节开始啮合时，受力分析情况如图2所示。

$$\begin{cases} -P_1 \sin(\beta + \varphi) - P_1 f \cos(\beta + \varphi) + S_1 \sin(\alpha + \varphi) = 0 \\ -P_1 \cos(\beta + \varphi) + P_1 f \sin(\beta + \varphi) + N + S_1 \cos(\alpha + \varphi) = 0 \\ MD - P_1 f \frac{d}{2} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中： $M$ 为滚子外侧切向力，N； $D$ 为滚子直径，mm。

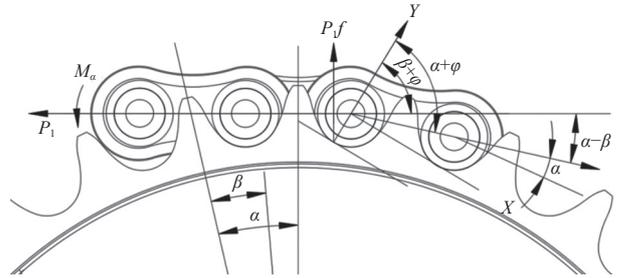


图2 外链节啮合铰链受力情况

将摩擦简化，令 $f_1=f$ 并代入式(3)得

$$\begin{cases} S_1 = P_1 \frac{\sin(-\beta + \varphi) + f \cos(\beta + \varphi)}{\sin(\alpha + \varphi)} \\ N = P_1 \frac{\sin(\alpha - \beta) - f \cos(\alpha - \beta)}{\sin(\alpha + \varphi)} \\ MD = \frac{1}{2} P_1 f d \end{cases} \quad (4)$$

当外链节进入啮合时，内铰链销轴接触部分始终通过 $P_1$ 和 $S_1$ 合力作用线，如图3a所示，销轴摩擦路程 $\alpha$ 较小，而套筒摩擦转角为 $360^\circ/z$ ，摩擦路程 $\beta$ 较大，对销轴不利。内链节进入啮合时，内铰链套筒接触部分始终通过 $P_1$ 和 $S_1$ 合力作用线如图3b所示，套筒摩擦路程 $\alpha$ 较小，而销轴摩擦转角为 $360^\circ/z$ ，摩擦路程 $\beta$ 较大，对套筒不利。

但外链节进入啮合时铰链始终是在摩擦力 $P_1 f$ 作用下转动的，而内链节进入啮合时则始终在摩擦

力  $S_1 f$  作用下转动。由于  $S_1 f$  为一变值，其均值小于  $P_1 f$ ，因此外链节进入啮合时铰链摩擦力超过内链节进入啮合时铰链摩擦力，导致实际应用中销轴比套筒磨损严重。因此，本研究针对性地对销轴和套筒的结构和热处理工艺进行了改进，进一步提高了传动链条的抗疲劳和耐磨性能。

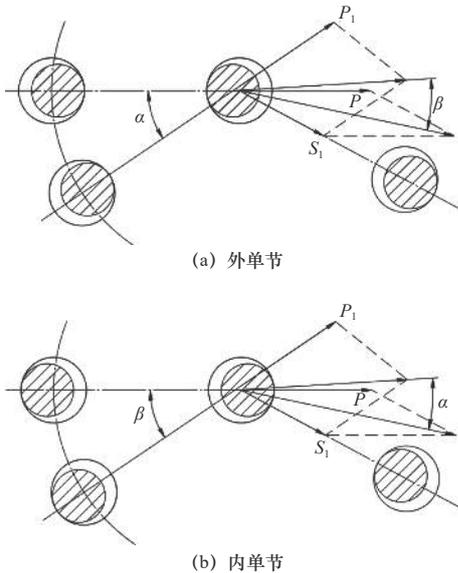
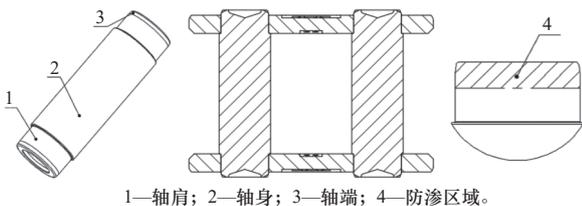


图3 啮合时铰链磨损情况

## 2 链条结构及工艺的创新设计

### 2.1 销轴的结构创新设计及制备工艺升级

针对传统一体式圆柱销轴工作过程中，外链节链板存在的牢固度下降、入侵销轴内侧，加速销轴磨损的问题，引入了一种异形头附带台阶式的销轴结构设计方案，如图4所示。图中销轴的两端1直径较小，为中间部位2直径的80%~90%，并且头端小径部分的长度为链板厚度的155%~185%。此外，销轴头部端面3设有胀大中心孔，孔径为头端外径的20%~40%，孔深为链板厚度的85%~110%。创新结构设计后的销轴在大规格大载荷作用下可以对链板进行稳定的轴向固定，避免链板对销轴工作面的磨损。



1—轴肩；2—轴身；3—轴端；4—防渗区域。

图4 改进销轴结构及防渗碳示意图

根据第1部分对啮合铰链的受力情况分析可知，销轴比套筒更加容易磨损。因此，销轴一般采用渗碳处理以提升其耐磨性能。销轴为20CrNiMo材质，原始渗碳热处理方案为直接升温至渗碳温度，并统一采用1.0%~1.1%的碳势进行渗碳处理，销轴受热不均匀，极易出现形变，导致工作过程中局部磨损严重。因此，针对销轴的热处理工艺进行了研究和改善，提出了分级升温 and 分期渗碳的热处理方案：即热处理升温阶段分别在200℃、400℃及600℃保温2h，并且将渗碳过程分为强渗阶段和扩散阶段，分别采用1.0%~1.1%和0.8%的碳势进行渗碳处理。

### 2.2 套筒的结构创新设计

传统的套筒轴向剖面形状通常为标准的内直边圆筒形，在压入链板后会出现颈缩现象，导致链长精度不稳定，而且套筒与销轴间隙过小，不利于润滑油的渗入，降低了链条的耐磨特性<sup>[9-11]</sup>。因此，本研究在套筒端部引入了锥角结构，锥顶角度 $\theta$ 为0.1°~0.5°，如图5所示，并将珩磨余量控制在0.02~0.1mm，有效减小了套筒后期的颈缩现象，使压入链板后的套筒内壁圆柱度达到了0.02mm。改进后的链条整体结构如图6所示。

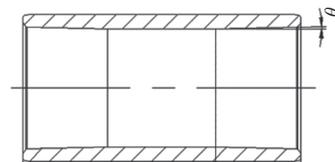


图5 套筒锥角结构示意图



图6 大功率海洋装备发动机链条装配图

## 3 链条性能测试

### 3.1 压铆实验

为了检验改进后的台阶式销轴的工作性能，本研究测量了单节装配过程中的压铆力测试，并观测了压铆链板后的销轴圆柱度及表面完整性。研究结果显示，相比与改进前的整体圆柱式销轴，改进后的台阶式销轴不仅可以牢固地将销轴和链板固定在

一起有效防止销轴在链板孔内发生窜动,而且可以显著降低装配压铆力,压铆力降低了24.7%。压铆力的降低有效避免了链板装配过程的冲击裂纹和扭曲变形,链板装配后的单节良品率提高了5.5%。

### 3.2 硬度及组分检测

为了检验改进后的销轴热处理工艺效果,本研究对销轴截面进行了深度方向的显微维氏硬度 $HV_{0.2}$ 测试,并采用Bruker Q4光谱仪分析了销轴表面的元素组成,结果分别见表1和表2。

表1 销轴深度方向的显微维氏硬度

距表面深度/mm	显微维氏硬度/ $HV_{0.2}$
0	802.5
0.1	710.8
0.2	691.7
0.4	652.9
0.8	549.8
心部	294.9
心部	283.1

表2 销轴表面元素组成

元素	占比/(%)
C	0.30
Si	0.34
Mn	0.95
Ni	0.65
Cr	0.69
Mo	0.32

由表1和表2中的显微硬度和元素组成测试结果可知,改进后的热处理工艺渗碳效果良好,各元素的含量均在预设的材料元素含量范围内,热处理显著提高了销轴表层的硬度,使销轴截面深度方向上呈现显著的梯度硬度,销轴表层硬度能为心部的2.5倍以上,逼近该材料的硬度极值,为获得更好的耐磨性能奠定了基础。

对销轴截面试样进行研磨、抛光、腐蚀后进行金相观测发现,经过渗碳热处理后,工件表层材料组织主要包含细针状回火马氏体和残余奥氏体,但残余奥氏体含量在10%以内,如图7a所示。细针状回火马氏体组织具有高硬度和高耐磨性的特性,而较低的残余奥氏体含量也不会显著降低销轴表面

的耐磨性,反而保证了其具备一定的韧性,有利于抵抗裂纹的生成和扩展。销轴内部心部的材料组织如图7b所示,主要由条状回火马氏体、铁素体和贝氏体组成。其中,条状回火马氏体具有较高的强度,有助于提高零件的抗拉和疲劳强度及刚性,而少量的铁素体存在有助于提高零件的韧性和抗疲劳性能。

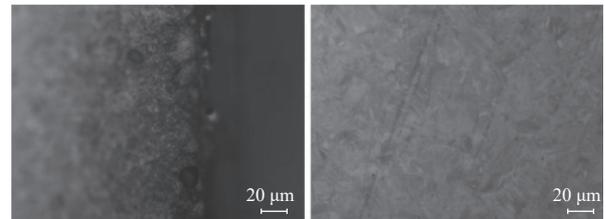


图7 金相观测图

### 3.3 耐磨性试验

采用自主研发的图8所示的封闭力流式超大规格链条耐磨试验机进行了链条的耐磨性能试验。该试验机基于封闭力流原理,采用了机械液压复合加载模式,在大规格、大功率及中低转速工况下,可以自适应补偿加载功率,提升测试结果的稳定性和可靠性<sup>[12]</sup>。



图8 封闭力流式超大规格链条耐磨试验机

按照企业制定的低速大功率船用发动机正时链耐磨试验大纲,试验在室温环境下进行,主动链轮齿数为28、从动链轮齿数为46、主动链轮转速为120 r/min、试验功率为335 kW。

试验结果显示,在初始磨损阶段的50 h内,即铰链磨合阶段,链条的伸长率在0.007%以下,比改进前链条的伸长率降低了17%。在初始磨损阶段,链条伸长主要是由于套筒装配时的颈缩现象。初始磨损阶段链条变形量的减小证明本研究对套筒结果的改进显著降低了颈缩现象,达到了设计预期。进一步的试验结果显示,在正常磨损阶段的150 h内,链条的伸长率保持在0.008%以下,比改进前链条的伸长率降低了9%。链条在正常磨损阶段,其伸长主要是由于销轴-套筒-滚子等摩擦副的摩擦磨损

导致的，链条伸长率的降低，证明链条销轴、套筒等零部件的耐磨性能有所提升，有利于延长链条的使用寿命。

### 3.4 疲劳寿命试验

大功率海洋装备用发动机传动链条一般要求使用寿命为25~30年，远高于其他类型的中低速发动机链条使用寿命，而且船用发动机正时链的工作速度较低，一般为80~120 r/min。因此，大型船用发动机正时链在达到耐磨伸长率标准的前提下，必须满足低速、重载荷工况下的疲劳性能要求。但是，传统高频疲劳试验加载方式更贴近与常规摩托车、汽车等领域链条的疲劳测试要求，与船用发动机链条的低速、重载工况不一致<sup>[13]</sup>。高频率加载方式有可能使得疲劳裂纹扩展不充分，使测试寿命高于实际寿命，增加大型船用发动机链条在实际运行中的失效风险。

因此，本研究采用10~20 Hz的低频疲劳试验技术开展了船用发动机正时链的疲劳寿命测试，如图9所示，使试验工况更接近于实际使用工况。

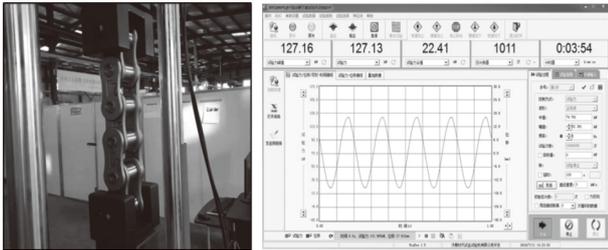


图9 低频疲劳试验样机

在动载强度159 kN条件下，根据式5采用升降法进行了12段疲劳试验，根据船用发动机链条疲劳寿命要求，设定加载循环周次为 $2 \times 10^6$ 。若中间出现链条断裂的情况下，则需降低一个步长的动载强度再次进行疲劳强度测试。反之，链条寿命超过设定的加载周次，则提升一个步长的动载强度，直至12组试验完成。详细试验数据和结果见表3。实验结果显示，改进后的所有链条样品全部通过了低频疲劳试验，不同载荷下的疲劳寿命均超过了 $2 \times 10^6$ 周次，表明改进后的链条能够满足设计要求，具有良好的耐疲劳性能。

$$\begin{cases} F_{\min} = (1\% \sim 5\%)F_u \\ F_{\max} = \frac{F_d F_u + F_{\min}(F_u - F_d)}{F_u} \end{cases} \quad (5)$$

式中： $F_{\min}$ 为最小载荷，kN； $F_{\max}$ 为最大载荷，kN； $F_u$ 为抗拉强度，kN； $F_d$ 为动载强度，kN。

表3 低速船用发动机正时链的疲劳试验结果

$F_{\max}/\text{kN}$	$F_{\min}/\text{kN}$	$F_d/\text{kN}$	结果
182	28	159	NF
198	28	175	NF
213	28	191	NF
229	28	207	NF
244	28	223	NF
260	28	239	NF
275	28	255	NF
291	28	271	NF
306	28	287	NF
322	28	303	NF
337	28	319	NF
353	28	335	NF

## 4 航海试验

为了验证所研发链条在实际环境下的可靠性，在5S50ME-B2.2型号发动机的轮船舱内进行了链条换装，如图10所示，然后对改进后的链条进行了长达2 000 h的航海试验。



图10 链条安装、试验样船、试验后拆机

航海试验结束后，在码头拆解并采用HYX120150LM型轮廓仪对拆卸下来的链条的销轴、套筒进行了轮廓仪磨损检测。检测结果显示，相对于初始状态，套筒内壁的最大磨损量为0.033 mm，而销轴外壁相对于初始状态的最大磨损量为0.09 mm，如图11所示。



图11 航海试验后磨损情况

对内单节节距进行了三坐标检测，发现内单节节距的极限差在0.01~0.02 mm。同时，截取15组

单节对链条进行了长度检测,结果见表4,其中,1~8为内单节,9~15为外单节。由结果可知,15节链条的总长度为1525.58 mm,而其名义长度为1524 mm,伸长率为0.103%,满足船用发动机对正时链条伸长率的要求。

表4 航海试验后链长检测记录

单节	长度/mm	单节	长度/mm
1	101.64	9	101.79
2	101.69	10	101.75
3	101.60	11	101.76
4	101.73	12	101.73
5	101.64	13	101.71
6	101.67	14	101.75
7	101.66	15	101.75
8	101.68		

## 5 结语

本论文针对大功率海洋装备发动机链条耐磨性能不足、使用可靠性较差的问题进行了结构创新设计及热处理工艺改进,在此基础上进行了硬度、耐磨性能、疲劳性能以及航海试验等,验证了改进后链条的使用性能。具体结论如下:

(1) 通过对链条进行结构创新设计以及优化改进热处理工艺,所生产的链条销轴表面硬度可达800 HV<sub>0.2</sub>以上,内单节压铆力比改进前降低了24.7%,链条在150 h磨损测试中伸长率降低了9%,链条在最大载荷353 kN、频率10 Hz的条件下经过2×10<sup>6</sup>周次的疲劳加载后未出现断裂的情况,一次性通过了12段升降疲劳试验。

(2) 将研发的链条安装到大功率海洋船舶发动机中进行了2000 h的航海试验,拆机测量套筒内壁最大磨损量为0.033 mm,销轴最大磨损值为0.09 mm,链条伸长率为0.103%,满足了大功率船

用发动机对正时链条伸长率的要求。

该研究突破了中国海洋装备发动机领域的技术难题,使中国成为全球第三个具备生产大功率海洋装备发动机传动链条能力的国家,为高端制造业中的技术创新提供了宝贵经验,具有重要的实际意义和推广价值。

## 参 考 文 献

- [1] 杜人淮. 破解“中国制造”向“中国创造”转型难题: 抉择和路径[J]. 现代经济探讨, 2009(3): 5-9.
- [2] 叶晓东. 试论从“中国制造”向“中国创造”转变[J]. 大连干部学刊, 2010, 26(2): 30-32.
- [3] 周济. 智能制造: “中国制造2025”的主攻方向[J]. 中国机械工程, 2015, 26(17): 2273.
- [4] 陈明义. 培育壮大我国的海洋工程装备制造业[J]. 发展研究, 2011, 5: 4-6.
- [5] Pedersen S L. Model of contact between rollers and sprockets in chain-drive systems[J]. *Archive of Applied Mechanics*, 2005, 74: 489-508.
- [6] 郭晓霞, 温慧, 李志豪. 高强度矿用圆环链23MnNiMoCr54钢的研发与应用[J]. 金属热处理, 2022, 46(2): 20-25.
- [7] 张经源. 链条传动及制造[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1989: 21-24.
- [8] 张立新, 田军委. 柔性铰链三维测头的设计及力学特性分析[J]. 西安工程大学学报, 2013, 27(2): 207-210.
- [9] 孟繁忠. 链传动技术手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016: 192-197.
- [10] 李一民, 郝志勇, 张志明, 等. 汽油机正时链传动动力学仿真研究[J]. 内燃机工程, 2013, 34(1): 81-86.
- [11] 钱江, 尹德兵, 翁建良, 等. Hy-Vo齿形链异形销轴压出力的理论计算与实验验证[J]. 机械传动, 2016, 40(11): 36-39.
- [12] 史京碧, 王顺功, 赵游鹏, 等. 超大规格链条耐磨试验台的研制[J]. 机械传动, 2020, 44(7): 124-127.
- [13] 杨刚, 史瑞华, 朱国仁. 链条疲劳性能测试方法研究[J]. 机械设计, 2008, 25(12): 17-19.

第一作者: 李存志, 男, 1990年生, 硕士, 高级工程师, 研究方向为链传动系统设计开发。E-mail: [cunzhili@126.com](mailto:cunzhili@126.com)

通信作者: 刘国梁, 男, 1990年生, 工学博士, 副教授, 研究方向为高性能绿色加工技术及减磨微结构激光加工技术。E-mail: [liuguoliang@qut.edu.cn](mailto:liuguoliang@qut.edu.cn)

(编辑 李静)

(收修改稿日期: 2024-03-16)

文章编号: 20240705

如果您想发表对本文的看法, 请将文章编号填入读者意见调查表中的相应位置。