

doi: 10.7690/bgzdh.2023.11.017

链式机枪滚子链链轮齿形改进仿真分析

王宪升, 张小石, 刘伟民, 姜黎明, 叶俊华

(重庆建设工业(集团)有限责任公司工艺技术研究所, 重庆 400054)

摘要: 针对滚子链传动过程中波动量大、平稳性差、啮合冲击力大的技术难题, 通过分析链轮齿形角一致性可降低传动过程中的啮合力以达成改进齿廓。借助 Abaqus 软件建立滚子链链条链轮的仿真模型, 通过仿真得到链条的波动量、啮合冲击力、速度不均等系数的曲线和空间速度、空间位移、应力分量的云图; 采用可信的比较标准波动量 Δh 和速度不均等系数 k 进行评估, 并进行射击试验。结果表明: 设计的外摆线等距齿轮的链式机枪滚子链传动机构的方案是有效可行的, 能够提高链式机枪在可靠传动时的动态性能。

关键词: 链式机枪; 外摆线等距齿轮; Abaqus 仿真

中图分类号: TJ279 **文献标志码:** B

Simulation Analysis of Improved Sprocket Tooth Profile of Chain Machine Gun Roller Chain

Wang Xiansheng, Zhang Xiaoshi, Liu Weimin, Jiang Liming, Ye Junhua

(Institute of Process Technology, Chongqing Jianshe Industry (Group) Co., Ltd., Chongqing 400054, China)

Abstract: In view of the technical problems of large fluctuation, poor stability and large meshing impact force in the process of roller chain transmission, the meshing force in the process of transmission can be reduced to improve the tooth profile by analyzing the consistency of sprocket tooth profile angle. The simulation model of roller chain and chain sprocket was established by Abaqus software, and the curves of fluctuation, meshing impact force and velocity inequality coefficient, and the nephograms of space velocity, space displacement and stress component of the chain were obtained by simulation. The credible comparison standard fluctuation Δh and velocity inequality coefficient k were used to evaluate, and the shooting test was carried out. The results show that the design scheme of roller chain transmission mechanism of chain machine gun with epicycloid equidistant gear is effective and feasible, which can improve the dynamic performance of chain machine gun in reliable transmission.

Keywords: chain machine gun; epicycloid equidistant gear; Abaqus simulation

0 引言

随着现代战争的发展和科技的进步, 高新技术得到迅猛发展, 一大批采用新结构、新原理的新型自动武器成功研制并装备部队, 使得自动武器性能以及军队作战能力得到了很大的提升。美国研制的 M230 型 30 mm 链式自动炮、英国“风暴”装甲车双人炮塔使用的 25 mm 链式炮、瑞士“锯脂鲤”装甲车上的 M242 型链式炮, 近年来我国也发展了 ZFBOS/03A 轻型轮式装甲车车载 23 mm 链式炮。现有轻武器存在耗弹量大、结构复杂、故障率高、故障排除困难、成本高等缺点, 尤其是无法克服迟发火对自动武器及作战人员带来的威胁, 在一定程度上制约了性能发挥。为进一步提高轻武器的性能, 研制一种结构简单、可靠性高的链式武器对于提高军队作战能力具有深远意义^[1-4]。

笔者针对某链式武器滚子链链条传动机构进行了改进, 应用 Abaqus 仿真软件建立了滚子链链条链轮的仿真模型, 得到了链条的啮合冲击力、波动量、速度不均等系数的曲线和空间速度的云图、空间位移、应力分量, 通过对曲线进行分析来研究齿轮齿廓实现类共轭啮合的方案对冲击速度接近为零的影响, 为以后的某链式武器滚子链链条传动机构的设计提供了理论依据和改进方向。

1 链式机枪滚子链链轮的改进

1.1 链式机枪原理

链式机枪是通过外能源驱动的以链式原理技术设计的武器。如图 1 所示, 链式机枪主要由电机、自动机、滚子链传动部件、枪管组件、输弹机组件等组成。通过电机带动滚子链传动, 进而带动自动机完成推弹、开闭锁、抽壳、抛壳等动作。链式原

收稿日期: 2023-07-02; 修回日期: 2023-08-05

第一作者: 王宪升(1990—), 男, 山东人。

理技术就是滚子链传动技术，研究链条齿轮啮合的机理，改变在运动过程中受到冲击部分的齿轮形状，设计出冲击速度接近为零的齿形，实现类共轭啮合是十分必要的。

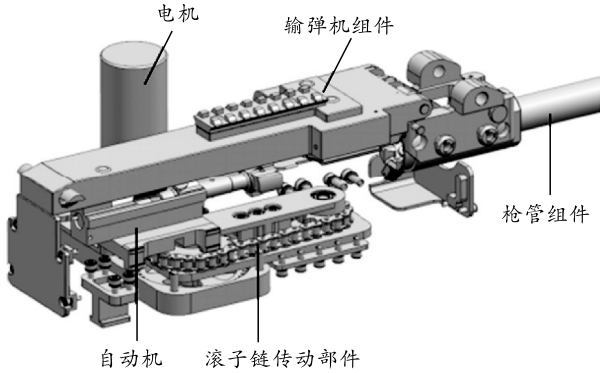


图 1 链式机枪结构

1.2 三圆弧一直线链轮齿形

三圆弧一直线齿形作为最普遍的滚子链齿形，符合 GB1244—85 相关标准。从图 2 中可看出，三段圆弧 *aa*、*ab*、*cd* 共同构成“三圆弧”，一段直线段 *bc* 构成“一直线”。其部分尺寸参数的计算公式如表 1 所示。

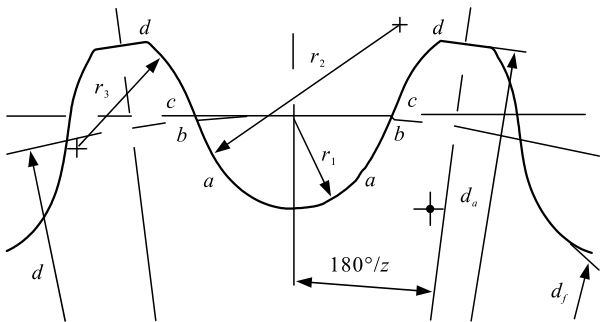


图 2 三圆弧一直线齿形

表 1 GB1244—85 三圆弧一直线齿形参数

名称	符号	计算公式
分度圆直径	d	$d=p/\sin(180^\circ/z)p$ -滚子链节距
齿根圆直径	d_f	$d_f=d-d_1d_1$ -滚子直径
齿顶圆直径	d_a	$d_a=p(0.54+\cot(180^\circ/z))$
齿沟圆弧半径	R_1	$R_1=0.502\ 5d_1+0.05$
工作段圆弧半径	R_2	$R_2=1.302\ 5d_1+0.05$
齿顶圆弧半径	R_3	$R_3=d_1[1.3\cos(17^\circ-64^\circ/z)+0.8\cos(18^\circ-56^\circ/z-1.3025)]-0.05$

1.3 外摆线等距滚子链轮

实现共轭传动比较典型的传动形式是齿轮传动。在齿轮传动中，主要有渐开线、摆线以及变态摆线 3 种共轭齿廓，但目前仅有渐开线齿廓得到了比较普遍的应用。摆线作为齿廓的研究国外有少量资料涉及，但是由于轮齿工作区采用摆线涉及到销齿传动的技术保密，国内研究尚没有开始。

如图 3 所示，当滚子的外圆半径为 r_1 ，齿根圆的半径为 r_2 ，外摆线向量夹角为 α ，滚圆转角为 β 。

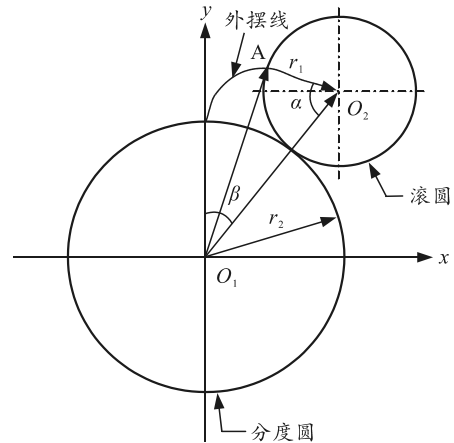


图 3 外摆线的形成过程

$$x(\beta) = (r_1 + r_2) \sin \beta - r_1 \sin(\beta(r_1 + r_2)/r_1); \quad (1)$$

$$y(\beta) = (r_1 + r_2) \cos \beta - r_1 \cos(\beta(r_1 + r_2)/r_1)。 \quad (2)$$

式(1)、(2)为滚子外圆上一点所形成外摆线轨迹方程。

$$x(\beta) = (r_1 + r_2) \sin \beta - r_1 \sin(\frac{r_1 + r_2}{r_1} \beta) + h \cos \frac{2r_1 + r_2}{2r_1} \beta; \quad (3)$$

$$y(\beta) = (r_1 + r_2) \cos \beta - r_1 \cos(\frac{r_1 + r_2}{r_1} \beta) - h \sin \frac{2r_1 + r_2}{2r_1} \beta。 \quad (4)$$

上述式(3)、(4)所示^[5-6]为包络法等距曲线方程。图 4 为滚子链 A 较链啮入时与轮齿冲击的情形。根据相对运动原理可知，较链与齿面的斜冲击可以等效转化，得出冲击速度公式为：

$$V_{cm} = \overline{ko_2} \omega \cos \varphi = \overline{\omega o_2 M} = \omega p \sin(\frac{360^\circ}{z} + \frac{\gamma}{2})。 \quad (5)$$

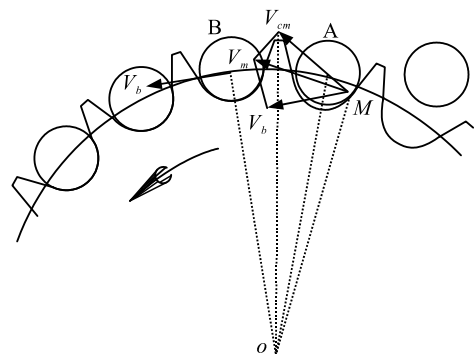


图 4 链条与链轮啮入的冲击速度

如果将齿形角 γ 变小，那么外摆等距线链轮齿廓方程的斜率就会增大，因此在 r_1 、 r_2 不变的情况下，只要将公式中的 β 角度改变，就能改变外摆等距线链轮的齿形角 γ ，在 NX8.0 中通过修改关系式中 β 值的大小来改进结果，从而达到改进齿廓的目的的如(6)所示^[7-8]。通过 matlab 拟合本文中 β 值为 1.5。

$$\frac{dy}{dx} = \frac{\frac{h(2r_1+r_2)}{2r_1} - 2(r_1+r_2)\sin\frac{r_2\beta}{2r_1}}{\frac{h(2r_1+r_2)}{2r_1} + 2(r_1+r_2)\sin\frac{r_2\beta}{2r_1}} \operatorname{ctg}\frac{(2r_1+r_2)\beta}{2r_1} \quad (6)$$

2 仿真与分析

2.1 建模

将 NX 中建立的链轮链条 3 维模型导入 Abaqus 中，在 Abaqus 中建立链轮、滚子链链条有限元模型，改进前为三圆弧一直线链轮，改进后为外摆线等距链轮。其中图 5 为添加完网格的链条和链轮，图 6 为添加完接触的链条和链轮^[9-10]。

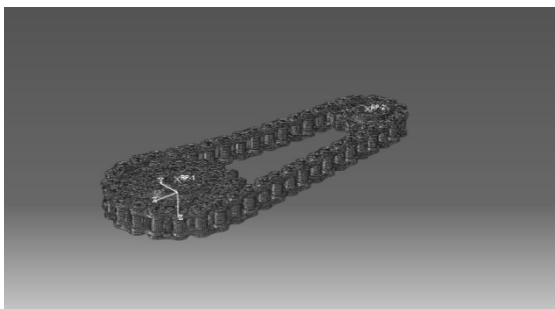


图 5 在 Abaqus 中链条和链轮网格

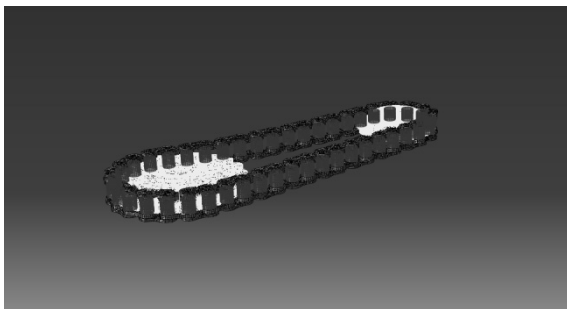


图 6 在 Abaqus 中链条和链轮添加接触

2.2 仿真分析

在 Abaqus 中的后处理中显示链条上同一结点的位移、速度、应力图如图 7—12 所示，其中位移改进前为 $4.114 \times 10^2 \text{ mm}$ ，改进后为 $4.071 \times 10^2 \text{ mm}$ ，改进量 1%；速度改进前为 $3.756 \times 10^3 \text{ mm/s}$ ，改进后为 $3.694 \times 10^3 \text{ mm/s}$ ，改进量 1.6%；应力改进前为 $1.704 \times 10^3 \text{ N}$ ，改进后为 $1.427 \times 10^3 \text{ N}$ ，改进量 16.2%。

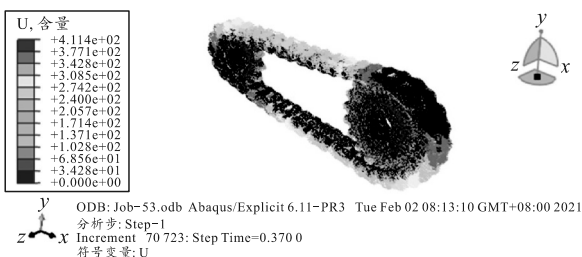


图 7 改进前位移云图

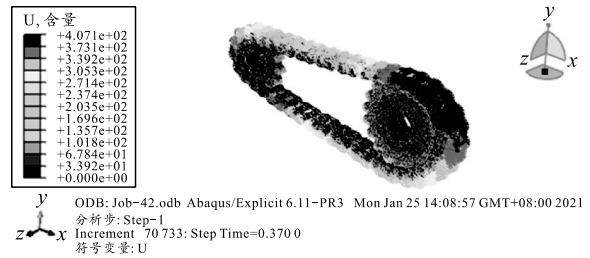


图 8 改进后位移云图

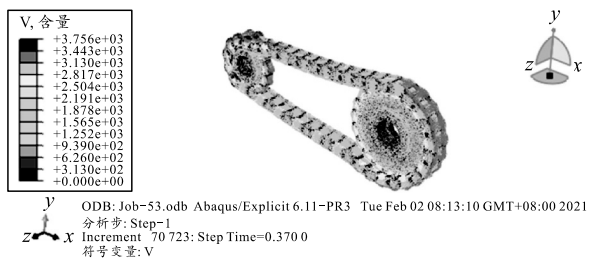


图 9 改进前速度云图

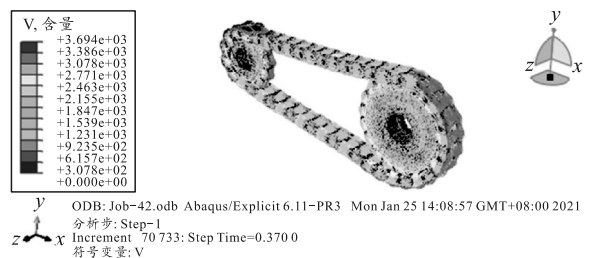


图 10 改进后速度云图

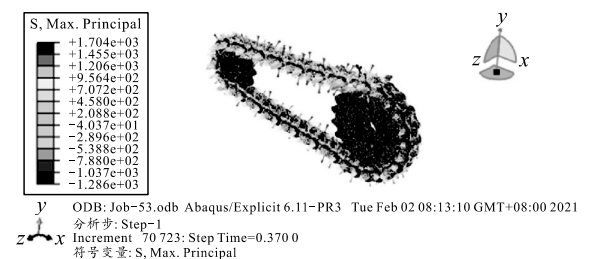


图 11 改进前应力云图

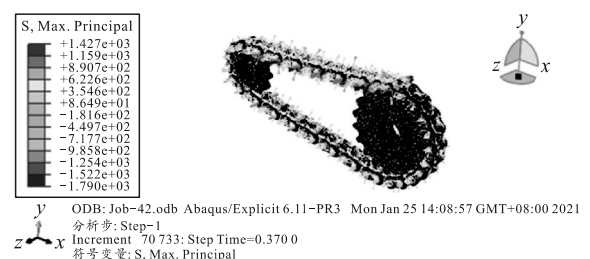


图 12 改进后应力云图

其中啮合冲击力、波动量、角度不均等系数如图 13—15 所示，啮合冲击力改进前为 712 N，改进后为 653 N，改进量 8.2%；波动量改进前最大值为 2.38，相对变化量 0.055，改进后为 2.365，相对变化量 0.04，改进量 27.2%，角度不均等系数改进前最小值为 1.76，相对变化量 0.04，改进后最小值为 1.78，相对变化量 0.02，改进量 50%。

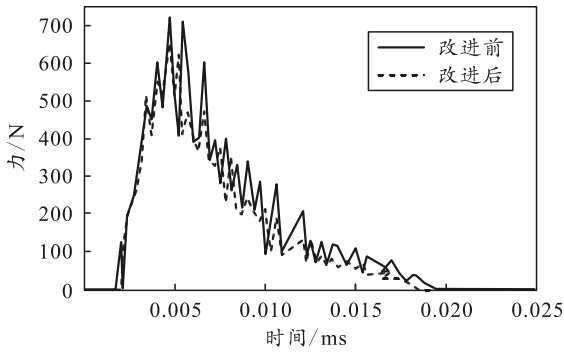


图 13 啮合冲击

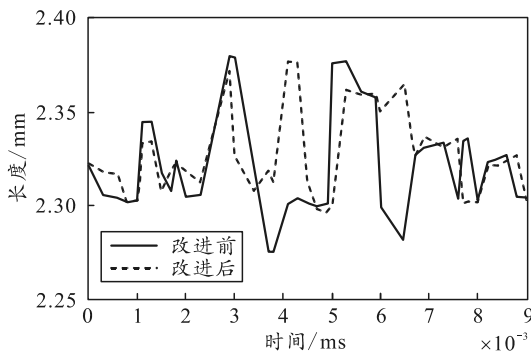


图 14 波动量

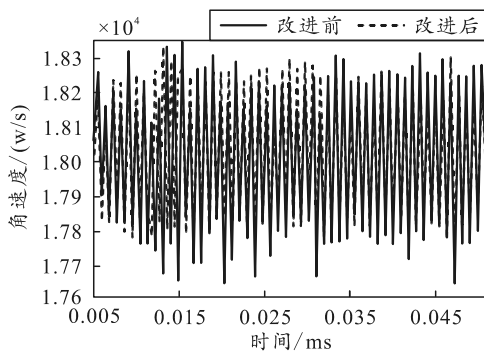


图 15 角速度不均等系数

3 模型验证

为了验证仿真模型的可信度，笔者将仿真结果应用至产品设计及制造中，对改进后的链传动机构进行了射击试验，射击过程传动灵活、无故障。结果表明：设计的外摆线等距齿轮的链式机枪滚子链传动机构的方案是有效可行的，能够提高链式机枪在可靠传动时的动态性能。图 16 为射击试验实物。



图 16 射击试验实物

4 结论

某一时刻同一结点的位移、速度、应力中应力改进量 16.2%。全程中啮合冲击力改进量为 8.2%、波动量改进量为 27.2%、角度不均等系数改进量为 50%。仿真过程中，所提出的外摆线等距齿轮方案仿真效果明显，能减小滚子链传动过程中波动量、提高平稳性、减小啮合冲击力大，进而提高链式机枪射击的可靠性。

参考文献:

- [1] 史亦超. 某新型自动发射系统动力学仿真研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2016.
- [2] 郭俊瑞, 姚养无, 张延平, 等. 导气式步枪自动机射击动力学仿真分析[J]. 计算机仿真, 2016, 33(5): 37-41.
- [3] 黄书伟. 自动武器冲击碰撞动力学精确建模技术[D]. 太原: 中北大学, 2019.
- [4] 郑建荣. Adams 虚拟样机技术入门与提高[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001: 93-104.
- [5] 苑大威, 沙金龙, 李鸽. 某自动武器击锤疲劳寿命仿真分析方法[J]. 火炮发射与控制学报, 2019(2): 33-36.
- [6] 李晓彤. 35 mm 双管转膛自动机总体设计与动力学仿真[D]. 太原: 中北大学, 2016.
- [7] 张丽平. 自动武器发射机构运动可靠性分析与设计研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2016.
- [8] 齐清. 步枪自动机缓冲技术研究[D]. 太原: 中北大学, 2016.
- [9] 袁志华. 链式火炮自动机结构改进及其动力学仿真研究[J]. 计算机仿真, 2017, 34(2): 20-24.
- [10] 宋杰. 榴弹机枪系统低后坐发射技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2017.