

doi: 10.7690/bgzdh.2023.11.003

空间大角度刚性扭转导引的改进设计

史慧锋, 戴劲松, 林圣业, 何 福
(南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

摘要: 为改善扭转导引的动力学性能, 提高无链供弹系统的稳定性, 对某供输弹系统的刚性大角度扭转导引进行分析与改进。通过分析扭转导引的结构及现有问题, 改进扭转导引的固定轴线和扭转角随轴线的变化规律, 并建立扭转导引的3维模型, 通过多体动力学仿真软件建立扭转导引的虚拟样机模型, 仿真分析其在300发/min射频下的运动规律。仿真结果表明: 弹在改进后的扭转导引中的运动更稳定顺畅, 验证了模型的准确性。

关键词: 无链供弹; 扭转导引; 固定轴线; 扭转角

中图分类号: TJ410.5 **文献标志码:** A

Improved Design of Space Large Angle Rigid Torsion Guidance

Shi Huifeng, Dai Jinsong, Ling Shengye, He Fu
(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of
Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In order to improve the dynamic performance of the torsion guidance and the stability of the chainless feeding system, the rigid large-angle torsion guidance of a ramming system was analyzed and improved. By analyzing the structure and existing problems of torsional guidance, the fixed axis of torsional guidance and the change law of torsional angle with the axis were improved, and the three-dimensional model of torsional guidance was established. The virtual prototype model of torsional guidance was established by multi-body dynamics simulation software, and its motion law was simulated and analyzed at 300 radio frequencies per minute. The simulation results show that the motion of the projectile is more stable and smooth in the improved torsional guidance, which verifies the accuracy of the model.

Keywords: chainless feeding; torsional guidance; fixed axis; torsional angle

0 引言

供弹系统作为连接弹箱和发射系统的中间传送系统, 结构复杂, 存在许多空间接口。空间刚性扭转导引作为供弹系统的重要组成部分, 可以引导弹按照一定的扭转规律运动到指定位置, 实现弹在空间运动中姿态的改变^[1-4]。罗露等^[5]设计了一种能够实现多种变形的节片, 提高了弹在扭转导引中的通畅性。王茂森等^[6]对某供输弹系统螺旋导引进行设计, 研究了弹链供弹的运动规律, 保证了有链供弹系统在螺旋导引运动中的通畅性, 为刚性导引的设计提供了指导。郑建兴^[7]在研究刚性导引的过程中, 采用同步带实现对弹的输送, 但此研究未涉及到扭转情况。

在国内外文献中, 对刚性扭转导引的研究较少。笔者针对某供输弹系统的刚性扭转导引在实际工作过程中, 经常存在由于扭转角过大导致弹的运动不平稳及卡死等情况, 对刚性扭转导引进行了研究。

1 空间扭转导引的分析与改进

1.1 扭转导引几何特征

扭转导引是在定长的条件下, 由一个截面沿着固定轴线, 按一定的扭转规律连续扫描形成的。扭转导引的构成要素包括过弹截面、固定轴线和扭转角随轴线的变化规律。固定轴线是扭转导引最核心的要素, 需根据进弹口与出弹口的位置确定。扭转导引共有5根导轨组成, 弹通过弹托挂在导轨1和导轨2上, 导轨3和导轨4对弹起限位作用, 导轨5对弹起支撑作用, 扭转导引的3维模型如图1所示, 在进弹口位置的截面如图2所示。

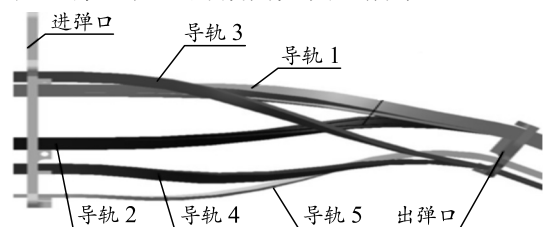


图1 扭转导引3维模型

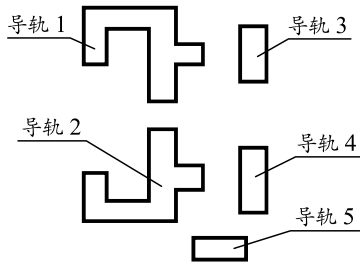


图 2 截面

固定轴线在设计时应满足：整个轴线函数应该是连续可导的，轴线在进弹口和出弹口位置应与相连供弹线路相切^[8-9]。若受总体结构的布局不能满足相切要求时，应使轴线两端的切向量与接口平面的法向量的夹角尽量小。在扭转导引的设计中，固定轴线经常采用多项式曲线进行设计，在定长的情况下进行分段设计，通常分为 3 段，首尾两段为二次曲线，中间段为直线，其曲线方程为：

$$z = \begin{cases} a_1x^2 + a_2x + a_3 & 0 \leq x \leq L_1 \\ a_4x + a_5 & L_1 \leq x \leq L_2 \\ a_6x^2 + a_7x + a_8 & L_2 \leq x \leq L_x \end{cases} \quad (1)$$

式中： L_x 为进弹口和出弹口之间的距离； L_1 为从进弹口到第一段抛物线右端的距离； L_2 为从进弹口到直线右端的距离； $a_i (i=1, \dots, 8)$ 为系数。

弹在沿着固定轴线切向运动的同时，还要绕着轴线旋转 90° ；因此扭转角随轴线变化规律的选取也十分重要。在确定变化规律时，还要满足弹托之间的扭转柔度要求，即两弹的相对扭转必须小于两弹托之间的最大扭转角。为了保证弹在扭转导引中运动的平稳性，通常情况下扭转角随轴线的变化规律也采用多项式曲线进行设计，首尾两端采用二次曲线，中间段采用直线，其曲线方程为：

$$\theta_x = \begin{cases} b_1x^2 + b_2x + b_3 & 0 \leq x \leq L_1 \\ b_4x + b_5 & L_1 \leq x \leq L_2 \\ b_6x^2 + b_7x + b_8 & L_2 \leq x \leq L_x \end{cases} \quad (2)$$

式中： θ_x 为扭转角； $b_i (i=1, \dots, 8)$ 为系数。

1.2 扭转导引的改进设计

通过分析上述曲线方程并结合实际运动过程发现，弹在运动过程中，速度和加速度会出现较大的波动，运动过程并不是很平稳，而且在每段轴线的交接处，速度和加速度会产生很大的突变值，同时也会产生很大的接触力，破坏导引结构的完整性，影响工作性能。所以要改进扭转导引的结构，以提高其工作性能。

当固定轴线采用三段式时，在每段轴线的交接

处会产生较大的突变值，使得运动过程不平稳，为改善这种情况，本次固定轴线采用一段式设计。为了使弹的运动更平稳，需保证每发弹走过的路线相同，由于出弹口低于进弹口，所以选用圆弧作为固定轴线，可以满足进弹口与出弹口相切的要求，如图 3 所示。

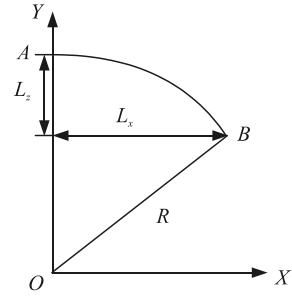


图 3 扭转导引固定轴线坐标

以圆弧的圆心为坐标原点建立 OXY 坐标系，图中 R 为圆弧的半径， L_z 为进弹口和出弹口的垂直距离， L_x 为进弹口和出弹口的水平距离， O 为圆弧的圆心。其几何关系方程可写作：

$$R = (L_x^2 + L_z^2) / 2L_z \quad (3)$$

在扭转导引中，扭转角随轴线的变化规律不相同也是造成弹运动不平稳的一个重要原因，因此需要重新设计扭转角随轴线的变化规律。在满足弹托之间扭转柔度要求的前提下，应尽可能使导引结构扭转均匀。本次扭转角随轴线的变化规律采用线性变化规律，使得在整个扭转过程中变化规律相同，减少了突变值的产生，使得运动更加稳定，其方程为：

$$\theta = \pi / 2L_x \quad (4)$$

在扭转导引通道横截面内建立牵连坐标系 $o'-x'y'z'$ ，在扭转导引截面内任一点沿 x 轴的扭转角为 $\theta_x (0 \leq \theta_x \leq 90^\circ)$ ，沿 y 轴的扭转角为 $\theta_y (0 \leq \theta_y \leq 15^\circ)$ ，在横截面内任一点的坐标 (x'_0, y'_0, z'_0) 通过坐标转换即可求得该点在绝对坐标系 $o-xyz$ 中的坐标值，坐标转换公式为：

$$\begin{cases} x \\ y \\ z \end{cases} = \begin{bmatrix} \cos \theta_y & \sin \theta_x \sin \theta_y & \cos \theta_x \sin \theta_y \\ 0 & \cos \theta_x & -\sin \theta_x \\ -\sin \theta_y & \sin \theta_x \cos \theta_y & \cos \theta_x \cos \theta_y \end{bmatrix} \begin{cases} x' \\ y' \\ z' \end{cases} \quad (5)$$

通过坐标转换得到扭转导引轴线截面内任一点的坐标为：

$$\left. \begin{aligned} x &= \cos \theta_y x' + \sin \theta_x \sin \theta_y y' + \cos \theta_x \sin \theta_y z' + x'_0 \\ y &= \cos \theta_x y' - \sin \theta_x z' + y'_0 \\ z &= -\sin \theta_y x' + \sin \theta_x \cos \theta_y y' + \cos \theta_x \cos \theta_y z' + z'_0 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

2 动力学建模及仿真分析

2.1 扭转导引仿真模型的建立

根据扭转导引的数学模型，运用软件编程后计算出 36 条样条曲线，将这些样条曲线导入 3 维建模软件中进行放样操作，画出 5 根导轨的实体模型，并进行装配，建立的扭转导引 3 维实体模型如图 4 所示。

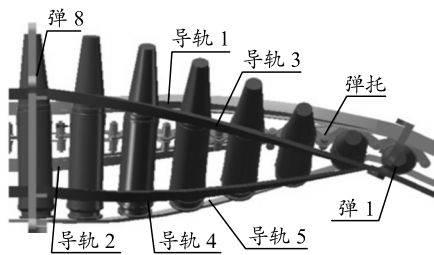


图 4 扭转导引实体模型

将装配好的 3 维模型导入动力学仿真软件中，建立扭转导引的虚拟样机模型，并根据实际情况对各零件施加约束，在具有相互运动的两构件之间添加约束副和碰撞约束。主要的约束关系如图 5 所示，其中 h_1 至 h_5 表示 5 根导轨与大地的固定副； h_6 、 h_7 表示导轨 1 和 2 与弹托的接触力； h_8 、 h_9 、 h_{10} 表示导轨 3、导轨 4 和 5 与弹的接触力； h_{11} 表示弹托与弹的固定副。根据实际情况，本研究中碰撞力的参数选取如表 1 所示。

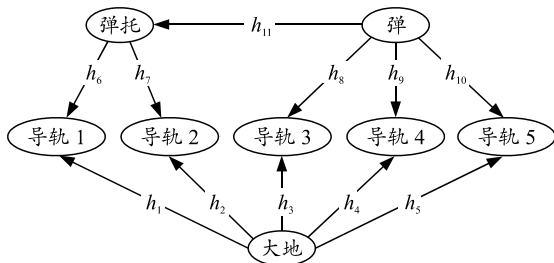


图 5 约束关系拓扑

表 1 参数选取

参数类型	参数值	参数类型	参数值
刚度系数/(N/m)	1×10^5	阻尼	50.0
力指数	1.5	最大穿透深度/mm	0.1

2.2 仿真结果分析

根据实际情况，在仿真过程中给第一发弹托以 300 发/min 的速度进行研究，让弹依次从进弹口运动至出弹口，研究弹在改进前和改进后扭转导引中的运动情况。扭转导引可容纳 8 发弹，为模拟弹在扭转导引中的实际运动情况，共对 16 发弹进行了运动仿真，选取中间 3 发弹作为研究对象，得到了弹在扭转导引中的速度和加速度曲线，见图 6—11

所示。

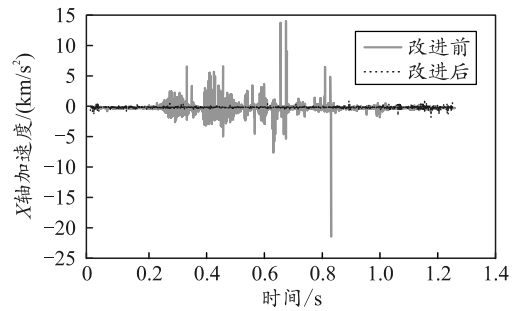


图 6 第 7 发弹加速度

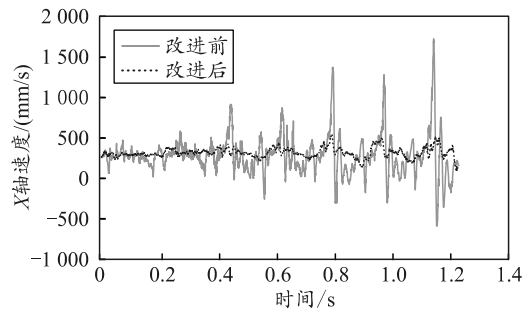


图 7 第 7 发弹速度

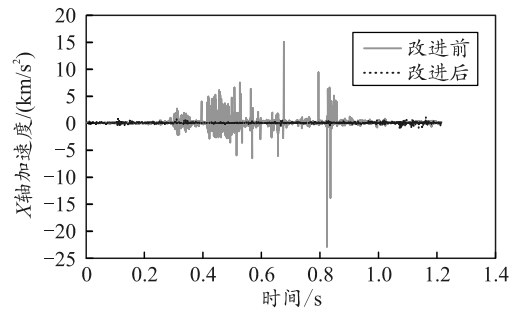


图 8 第 8 发弹加速度

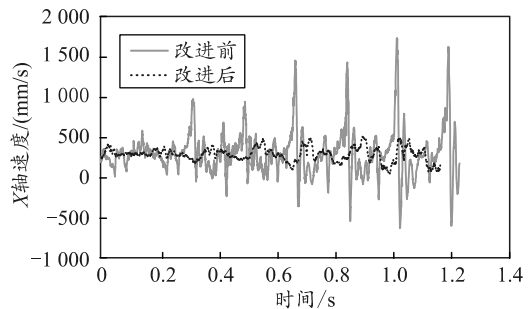


图 9 第 8 发弹速度

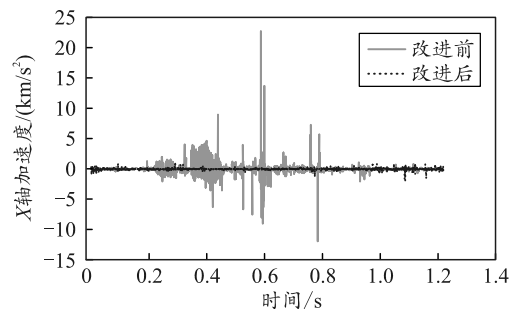


图 10 第 9 发弹加速度

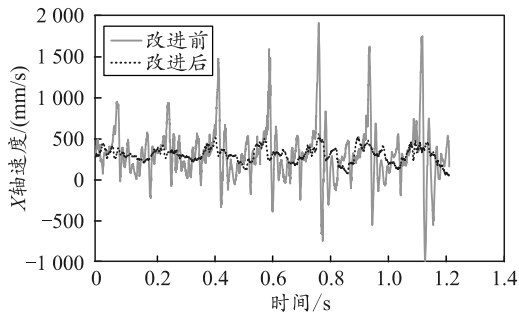


图 11 第 9 发弹速度

通过观察图像得到改进前后弹加速度的最大值，如表 2 所示。

表 2 优化前后最大加速度对比 km/s^2

方案	第 7 发弹	第 8 发弹	第 9 发弹
改进前	14.259	15.901	23.080
改进后	1.226	1.128	1.167

分析上表可以得出，改进前的加速度最大值为 23.08 km/s^2 ，改进后的加速度最大值为 1.226 km/s^2 ，由图 6—11 可以看出改进前的速度和加速度曲线的波动较大，会产生很大的突变值，弹的速度存在负值，表明弹不能光滑平稳的在扭转导引运动，同时由于加速度产生的突变会对导引产生冲击，使得扭转导引产生剧烈晃动，甚至破坏扭转导引结构的完整性。观察改进后的曲线可以发现，加速度曲线峰值震荡比较均匀，无较大突变值，减小了对导引的冲击。通过观察速度曲线发现，弹丸在改进后的扭转导引运动过程中速度均大于 0，波动比较稳定，表明弹在运动过程中比较可靠，能顺利通过扭转导引，提高了扭转导引的运动学性能。

3 实验验证

3.1 实验装置介绍

本次加速度测量装置采用模拟弹进行测量^[10]，模拟弹可以测量高速运动弹丸的加速度，内部装有加速度测量模块和数据存储模块。在设计模拟弹时，外形与实弹一样，同时在模拟弹弹头增加配重，使模拟弹的质量、重心与实弹一致，提高实验数据的准确性。图 12 为模拟弹结构图。

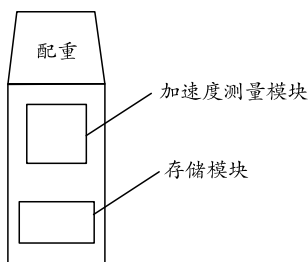


图 12 模拟弹结构

3.2 结果对比

实验时将第 8 发弹换成模拟弹，测量弹从进弹口运动至出弹口时的加速度大小。对数据处理后可得到第 8 发弹的加速度数据，取第 8 发弹的仿真结果与实验结果进行对比，如图 13 所示。

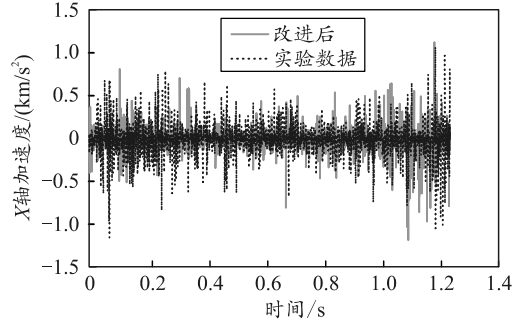


图 13 加速度结果对比

观察上图，得到加速度的最大值，见表 3 所示。加速度最大值的相对误差在 5.23% 以内，验证了模型的正确性。

表 3 加速度结果对比

轴向	最大加速度/ km/s^2		误差/%
	实验	仿真	
X 轴正向	1.069	1.128	5.23
X 轴负向	1.173	1.178	0.42

4 结束语

在无链供弹系统中，弹能否快速平稳通过导轨是评价无链供弹系统稳定性的重要指标。笔者通过对扭转导引模型进行分析，提出了改进方案，通过对比发现弹在改进后的模型中过载更小，速度更加稳定。在扭转导引中的运动更加平稳，并通过实验验证了模型的准确性，为刚性扭转导引设计提供理论指导。本方案适用于进弹口和出弹口存在高低位置差的情况，当进弹口和出弹口位置在同一高度时，还需进一步研究。

参考文献：

- [1] 戴劲松, 王茂森, 苏晓鹏, 等. 现代火炮自动机设计理论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2018: 18-20.
- [2] 王扬. 无中心节片式柔性导引结构设计及运动特性分析[D]. 南京: 南京理工大学, 2018.
- [3] WANG K. Analyzing Structure of Carrier Stage from Transmission Device of Ammunition Carrying and Feeding System[J]. International Journal of Education and Management, 2019, 4(4): 1-4.
- [4] 高云峰, 王刚, 满孝杰, 等. 某型链式炮供弹机构设计及动力学分析[J]. 机械设计与制造工程, 2021, 50(9): 17-20.