

环境适应性设计与分析

基于 ADAMS 的转膛机构滑板优化分析

菅润基¹, 于存贵¹, 李昊², 许俊²

(1. 南京理工大学, 南京 210000; 2. 中国船舶重工集团公司第七一三研究所, 郑州 450000)

摘要: **目的** 设计一种合适的滑板曲线槽, 以提高转膛体稳定性。**方法** 应用凸轮机构运动原理, 以滑板为主动件, 转膛体滚轮为从动件, 通过类比不同类型的曲线槽, 对比其加速度、速度变化规律, 选择加速度无突变、没有刚性冲击及柔性冲击的五次多项式运动规律进行设计。在三维软件中绘制好三维模型后, 对其进行运动学仿真分析, 对比转膛体滚轮在传统曲线槽与该种曲线槽约束下转膛体的运动稳定性。**结果** 滑板曲线槽在运用五次多项式运动规律进行设计后, 转膛体的运动稳定性得以提升, 其中, 角速度峰值由 1479.76 (°)/s 降到了 1023.70 (°)/s, 降低了 30.82%; 角加速度峰值由 3.3×10^5 (°)/s 降到了 1.58×10^5 (°)/s, 降低了 52.12%。**结论** 应用五次多项式运动规律的曲线槽对提高转膛体运动稳定性有明显作用, 为滑板的设计提供了参考。

关键词: 转膛机构; 滑板; 转膛体; 凸轮设计; 动力学仿真

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2019.10.012

中图分类号: TJ303+2 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2019)10-0071-05

Optimization of Slide for Revolver Automatic Gun Based on ADAMS

JIAN Run-ji¹, YU Cun-gui¹, LI Hao², XU Jun²

(1. Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210000, China;

2. No. 713 Institute of China Shipbuilding Industry Corporation, Zhengzhou 450000, China)

ABSTRACT: Objective To design a suitable slide curve groove to improve the stability of the revolving body. **Methods** The principle of motion of the cam mechanism was applied. With the driving slide as the active part and the revolving body roller as the follower, the acceleration and the speed change law of different curved grooves were compared. The fifth-order polynomial motion law without sudden change in acceleration or rigid impact and flexible impact was designed. After the model was drawn in 3D software, the kinematics simulation analysis was carried out to calculate the motion stability of the revolving body while its wheel was constrained by the traditional curved groove and the curved groove. **Results** It was found that the motion stability of the revolving body was improved after the curve groove of slide was designed with fifth-order polynomial motion law. The angular velocity peak was reduced from 1497.76 (°)/s to 1023.70 (°)/s, which was reduced by 30.82%; the angular acceleration peak was reduced from 3.3×10^5 (°)/s to 1.58×10^5 (°)/s, which was reduced by 52.12%. **Conclusion** The curved groove with the fifth-order polynomial motion law has a significant effect on improving the stability of the rotating body, which provides a reference for design of the slide.

KEY WORDS: revolver-type automatic gun; slide; revolving body; cam design; dynamics simulation

收稿日期: 2019-04-19; 修订日期: 2019-06-05

作者简介: 菅润基 (1994—), 男, 山西人, 硕士研究生, 主要研究方向为火炮发射机构总体及仿真技术。

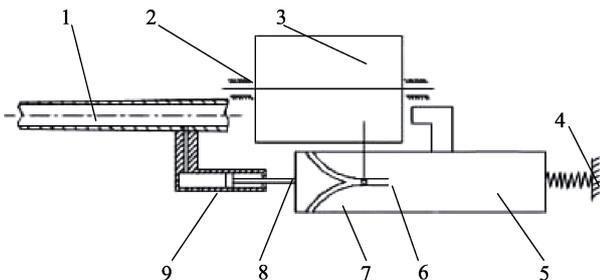
通讯作者: 于存贵 (1965—), 男, 山西人, 博士, 副教授, 主要研究方向为火箭导弹发射系统总体及仿真技术。

转膛机构是转膛自动机的关键部件，转膛自动机是指以多个弹膛回转完成自动工作循环的自动机，根据驱动方式可分为管退式转膛自动机和导气式转膛自动机。导气式转膛机构的工作原理是通过导气装置将火药燃气从身管内膛导出，推动滑板运动，滑板的直线往复运动通过曲线槽与滚轮变成转膛体的回转运动^[1-3]。因此，滑板曲线槽的形状对转膛体的运动稳定性具有重要的影响^[4]。文献[1-2]基于工程经验给出了一种椭圆形曲线槽的设计方法。闫彬等^[4]以某转膛机构为研究对象，建立该自动机的两自由度数学模型，指出了滑板曲线槽直线段与弧线段长度不同时对转膛体运动稳定性的影响。这些方法并没有对曲线槽的形状本身进行深入分析。

何大平^[5]在转管武器机心凸轮曲线的设计中按加速度规律的不同，类比了三种凸轮曲线，指出了一种对从动件冲击较小的曲线，取得了良好的效果。文中借鉴该设计方法，以某导气式转膛机构为研究对象，应用凸轮机构运动原理，类比不同类型的曲线槽，对比其加速度、速度变化规律。选择加速度无突变、无刚性冲击及柔性冲击的五次多项式运动规律进行设计，并对此曲线槽约束下转膛体的运动特性进行了研究。

1 导气式转膛机构工作原理

导气式转膛机构主要由导气装置、转膛轴、滑板、滑板复进簧、转膛体、转膛体滚轮、活塞杆等组成，如图1所示。该转膛机构具体工作原理是：弹丸点火后，火药燃气通过导气装置作用在滑板上，推动滑板向后运动，同时压缩滑板复进簧，滚轮在滑板曲线槽的作用下转动一定角度；滑板在滑板复进簧的作用下向前运动时，滚轮进入另一段曲线槽，转动同样角度。这样转膛体滚轮在曲线槽内的运动可以将转膛体准确、可靠地转动固定的角度，实现转膛体运动的衔接。转膛体在驱动滑板作用下的旋转过程如图2所示。



1—身管；2—转膛轴；3—转膛体；4—滑板复进簧；5—滑板；6—转膛体滚轮；7—滑板曲线槽；8—活塞杆；9—导气装置

图1 导气式转膛机

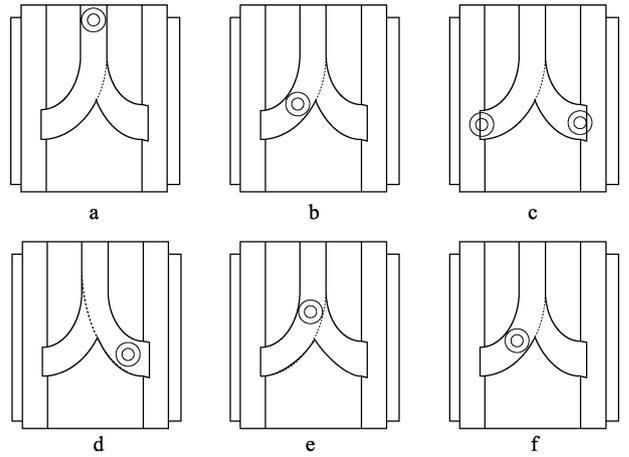
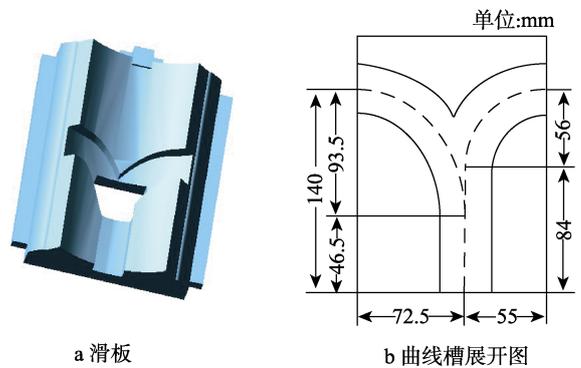


图2 转膛旋转方法

2 滑板曲线槽的设计

2.1 椭圆形曲线槽

驱动滑板的曲线槽一般由一条直线段加两条椭圆曲线段组成。考虑到在后坐运动中，驱动滑板速度较大，转膛体滚轮所受接触力较大，因此后坐段曲线轨迹的变化较“快速”，以使驱动滑板的传动受力能够减小。参照文献[1-2]的设计方法，设计滑板曲线槽如图3所示。



a 滑板

b 曲线槽展开图

图3 椭圆形曲线槽滑板

2.2 五次多项式形曲线槽

应用凸轮机构运动原理，以驱动滑板为主动件，转膛体为从动件，则对应于不同类型的曲线槽，转膛体有不同的运动规律。在实际应用中，常见的曲线槽类型按从动件加速度运动规律的不同大致可以分为以下几类^[5-6]。

1) 常数阶跃形加速度曲线。这种类型的曲线通常的形状是：曲线-直线-曲线。按应用范围的不同，曲线可以是抛物线或者圆弧。这类曲线的优点是结构简单，加工容易。缺点是加速度有突跃，对从动件运动平稳性有影响。

2) 正弦加速度曲线。这种类型的曲线是由正弦曲线和二次抛物线组合而成。因为位移是正弦函数，

加速度也是正弦曲线，所以它的加速度曲线变化平稳，无拐点。这种曲线加工难度大，成本高。

3) 多项式运动规律曲线。这种规律的从动件位移曲线的一般形式为：

$$s = c_0 + c_1\delta + c_2\delta^2 + \dots + c_n\delta^n$$

式中： $c_0, c_1, c_2, \dots, c_n$ 为 $n+1$ 个系数，这些系数由运动规律所提的边界条件确定。一般而言，次数越高，加工难度越大，超过 10 次的多项式规律很少使用。因此，五次多项式运动规律较为常用，且最大速度及最大加速度均小于正弦加速度规律。五次多项式运动规律运动线图如图 4 所示，其运动方程为：

$$\begin{cases} s = C_0 + C_1\delta + C_2\delta^2 + C_3\delta^3 + C_4\delta^4 + C_5\delta^5 \\ v = ds/dt = C_1\omega + 2C_2\omega\delta + 3C_3\omega\delta^2 + 4C_4\omega\delta^3 + 5C_5\omega\delta^4 \\ a = dv/dt = 2C_2\omega^2 + 6C_3\omega^2\delta + 12C_4\omega^2\delta^2 + 20C_5\omega^2\delta^3 \end{cases}$$

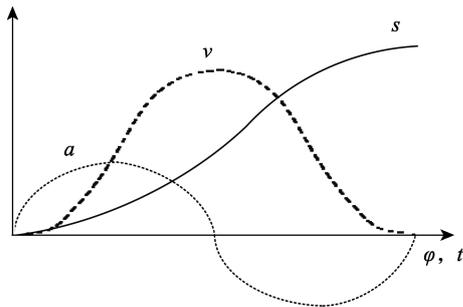


图 4 多项式运动规律

有边界条件如下：

在起始点： $\delta=0, s=0, v=0, a=0$ ；

在终点处： $\delta=\delta_0, s=h, v=0, a=0$ ；

由此可得各项待定系数为：

$$C_0=0, C_1=0, C_2=0, C_3=10h/\delta_0^3,$$

$$C_4=-15h/\delta_0^4, C_5=6h/\delta_0^5$$

故可得 5 次多项式运动规律的运动方程为：

$$s = 10h/\delta_0^3 \times \delta^3 - 15h/\delta_0^4 \times \delta^4 + 6h/\delta_0^5 \times \delta^5$$

依据所得到的运动方程分别对后坐曲线段和复进曲线段进行设计，设计内容只包括曲线槽形状，因此曲线段长度仍保持与椭圆形曲线槽一致。考虑到绘图方便，将曲线方程引入参数 t ，改写运动方程：

$$\begin{cases} x = R \times \delta_0 \times t \\ y = h \times (10t^3 - 15t^4 + 6t^5) \end{cases} \quad t \in (0,1)$$

式中： $t = \delta/\delta_0$ ； R 为转膛体滚轮顶端距转膛轴距离， $R=101.5$ mm。

取后坐曲线段长度 $a_1=93.5$ mm，即滑板后坐 93.5 mm 时，转膛体旋转 0.2π 。以此为约束条件，结合五次多项式运动规律的运动方程，则可得后坐段曲线方程为：

$$\begin{cases} x = 101.5 \times 0.2\pi \times t \\ y_1 = 93.5 \times (10t^3 - 15t^4 + 6t^5) \end{cases} \quad t \in (0,1)$$

同理可得复进段曲线方程为：

$$\begin{cases} x = 101.5 \times 0.2\pi \times t \\ y_1 = 56 \times (10t^3 - 15t^4 + 6t^5) \end{cases} \quad t \in (0,1)$$

修改后的曲线槽展开图如图 5 所示。

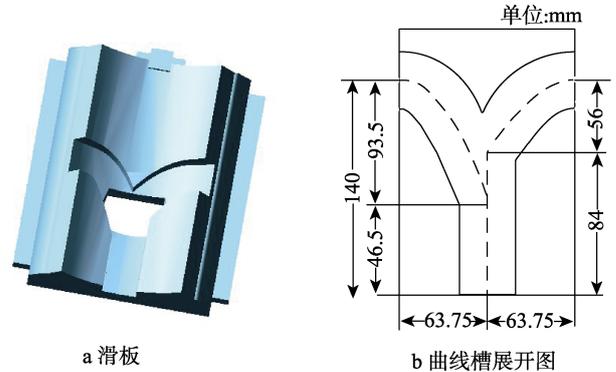


图 5 五次多项式形曲线槽滑板

3 动力学建模及仿真分析

3.1 转膛机构仿真模型建立

3.1.1 接触力模型设置

由于滑板和转膛体滚轮之间的运动关系难以用常用的运动副来表示，所以需使用 ADAMS 中的接触力来进行约束。因此能否正确设置接触力模型将影响分析的准确性。

ADAMS/Solver 中计算碰撞力分为两种方法：Restitution（补偿法）和 Impact（冲击函数法）^[9]。一般来说，补偿法只需要确定惩罚系数和补偿系数两个参数，但由于参数难以准确设置，因此计算结果并不准确。通常选用冲击函数法来计算碰撞力，其表达式为：

$$Impact = \begin{cases} 0 & q > q_0 \\ k(q_0 - q)^e - c_{max} \cdot \frac{dq}{dt} \cdot step & q \leq q_0 \\ (q, q_0 - d, 1, q_0, 0) & \end{cases}$$

式中： q 为两物体碰撞过程中的实际距离； dq/dt 为两个物体间距离随时间的变化率，即速度； k 为刚度系数； e 为碰撞指数； c_{max} 为最大阻尼系数； d 为切入深度，表示最大阻尼时的侵入深度。

为了防止碰撞过程中阻尼力的不连续，式中采用了 step 函数：

$$step = \begin{cases} h_1 & x \leq x_0 \\ h_0 + a \cdot \sigma^2 (3 - 2\sigma)x_0 & x_0 < x < x_1 \\ h_1 & x \geq x_1 \end{cases}$$

式中： $a = h_1 - h_0$ ； $\sigma = (x - x_0)/(x_1 - x_0)$

碰撞参数的设置根据参考文献[10]的计算方法设定，取转膛体滚轮与后坐滑板的刚度系数 $k=$

13 200 N/mm，力指数 $e=1.5$ ，阻尼 $c=50 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{mm}$ ，渗透深度 $d=0.1 \text{ mm}$ 。

3.1.2 虚拟样机建立

根据转膛机构实际的运动过程作如下假设及简化：将各构件均视为刚性体，忽略其弹性变形；对机构中的零部件进行简化处理，忽略部分圆角及倒角；各部件以旋转副、滑移副等运动副与炮箱相连，炮箱则固定于大地。

将转膛机构三维模型导入 ADAMS/View 中，定义各运动副。为描述方便，在图 6 中将该转膛机构的结构用拓扑图的形式加以解释， h 表示部件间的连接关系或力的作用关系。

在图 6 中， h_1 炮箱连接大地的固定副； h_2 、 h_3 分别是连接活塞杆和滑板与炮箱之间的移动副； h_4 代表转膛轴与炮箱之间的固定副； h_5 是通过导气装置的火药燃气作用在活塞杆上的力； h_6 是活塞杆与滑板之间的接触力； h_7 为转膛体与转膛轴之间的旋转副； h_8 为滑板与转膛体（曲线槽）之间的接触力； h_9 连接转膛体滚轮与转膛体之间的固定副。经简化后，建立的虚拟样机模型如图 7 所示。

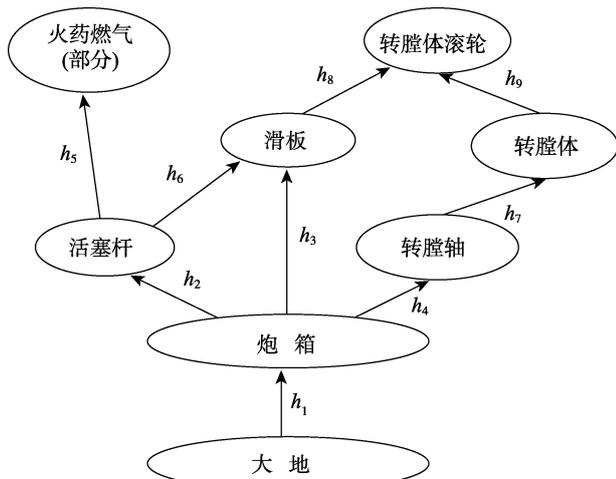


图 6 转膛机构拓扑关系

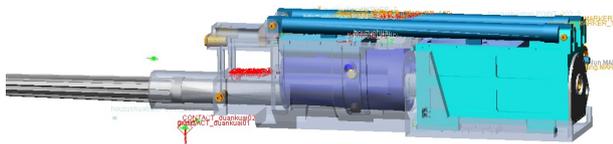


图 7 虚拟样机模型

3.2 仿真结果分析

依据所建立的虚拟样机，对转膛机构的两个工作循环进行动力学仿真，获得在不同曲线槽作用下转膛体的运动特性曲线，如图 8、图 9 所示。

由图 8、图 9 可得出以下结论。

1) 两种曲线槽作用下，转膛体转动角度相同，表明利用凸轮原理所设计的五次多项式形曲线槽可以实现同样作用。2) 对比前后转膛体的运动特性可

以看出，其角速度峰值由 $1479.76 \text{ (}^\circ\text{)}/\text{s}$ 降到了 $1023.70 \text{ (}^\circ\text{)}/\text{s}$ ，降低了 30.82%。其角加速度峰值由 $3.3\times 10^5 \text{ (}^\circ\text{)}/\text{s}$ 降到了 $1.58\times 10^5 \text{ (}^\circ\text{)}/\text{s}$ ，降低了 52.12%，表明转膛体的运动稳定性得以提升。

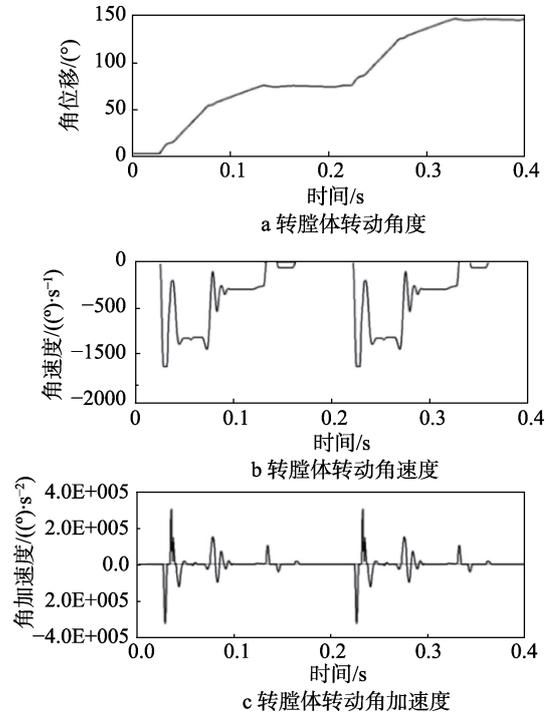


图 8 椭圆形曲线槽作用下转膛体运动特性

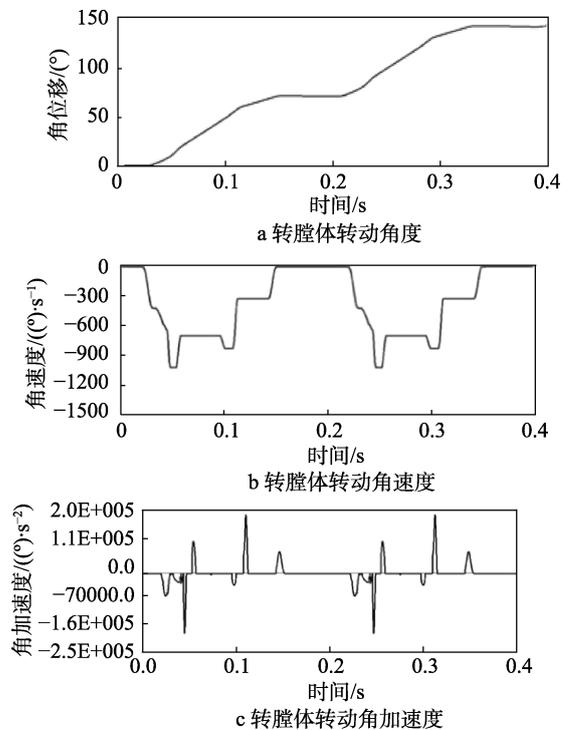


图 9 五次多项式形曲线槽作用下转膛体运动特性

4 结论

针对转膛机构，提出了一种采用五次多项式运动

规律的曲线槽。仿真结果表明, 该曲线槽下作用转膛体运动特性较好, 适用于转膛自动机的结构设计, 有一定的工程实践意义。

参考文献:

- [1] 谈乐斌, 张相炎, 管红根, 等. 火炮概论[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2005: 101-108.
- [2] 张相炎. 火炮自动机设计[M]. 第 2 版. 北京: 北京理工大学出版社, 2015: 62-64.
- [3] 齐晓林. 航空自动武器[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 145-149
- [4] 闰彬, 姚忠, 王瑞, 等. 某火炮自动机转膛机构运动特性分析[J]. 火炮发射控制学报, 2010(2): 66-69
- [5] 何大平. 新型喷管气流反推式转管武器的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2004.
- [6] 范元勋, 张庆. 机械原理与机械设计(上册)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2014: 77-82.
- [7] SHEN G J, CAO H S, LIU H Z, et al. The Dynamic Simulation and Optimization Platform Design of Gun Automatic Mechanism Based on ADAMS[C]// 2012 International Conference on System Simulation. Hong Kong, 2012.
- [8] 洪嘉振. 计算多体系统动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999: 247-276.
- [9] 李增刚. ADAMS 入门详解与实例[M]. 第 2 版. 北京: 国防工业出版社, 2014: 126-128.
- [10] 夏永. 基于 ADAMS 的风电齿轮箱动力学仿真分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.