

文章编号 1004-924X(2009)12-3047-08

# 激光切割头摆动机构的动力学仿真及试验

郑黎明, 邓春萍, 杨慎华, 郑祺峰

(吉林大学 锻锻工艺研究所, 长春 吉林 130022)

**摘要:**激光切割裂解槽机床是连杆裂解加工的关键设备之一,用于完成连杆初始裂解槽的切割。本文介绍了该机床的激光头摆动机构,对摆头机构进行了 ADAMS 动力学仿真。根据仿真结果确定了合理的液压参数(液压压力为 2.5 MPa,溢流阀流量系数为 0.2),并完成了摆头机构的物理切割试验。试验结果表明,在合适的工艺参数条件下,摆头机构的定位精度达到 $\pm 0.02$  mm,且工作稳定、可靠,连杆裂解槽槽深均为 $(0.5 \pm 0.05)$  mm。提出了伺服电机驱动激光头摆头方案,对改进的摆头方案进行了 ADAMS 运动学仿真。仿真结果表明,改进后的摆头机构可在 0.4 s 内完成摆头动作,且摆动角度调整方便,说明改进后的摆动机构是较理想的激光头摆动方案,可为连杆初始裂解槽激光加工主机结构优化提供可靠的理论依据。

**关键词:**连杆裂解;摆动机构;激光切割头;动力学仿真;ADAMS

**中图分类号:**TG665 **文献标识码:**A

## Dynamics simulations and experiments of asway mechanism for laser cutting head

ZHENG Li-ming, DENG Chun-ping, YANG Shen-hua, ZHENG Qi-feng

(Roll Forging Institute, Jilin University, Changchun 130022, China)

**Abstract:** The laser cutting fracture splitting notch processing machine is one of the key apparatuses used for cutting the fracture splitting notch of connecting rod. The asway mechanism of the machine is introduced, and a series of dynamics simulations are carried out. Based on the simulation results, rational hydraulic parameters (at a optimum hydraulic pressure of 2.5 MPa and a throttle valve's discharge coefficient of 0.2) are determined, and physical cutting tests are also undertaken. Experimental results indicate that the asway mechanism can provide a stable and reliable working state and its positioning accuracy reaches 0.02 mm under the depth of fracture splitting notch in  $(0.5 \pm 0.05)$  mm. Meanwhile, a scheme in which the asway mechanism in driven by a electromotor is presented and the ADAMS kinematic simulations towards the improved asway mechanism are accomplished. The simulation results show that the improved asway mechanism can complete the asway process in 0.4 s with a more accurate asway angle, which proves that the servo electromotor driven asway mechanism is reasonable and can provide a reliable theoretic basis for optimizing the structure of the laser cutting fracture splitting notch machine.

收稿日期:2009-04-08;修订日期:2009-06-08.

基金项目:“十五”科技攻关计划资助项目(No. 2004BA907A19)

**Key words:** fracture splitting connecting rod; asway mechanism; laser cutting head; dynamics simulation; ADAMS

## 1 引言

近年来,在节约能源,降低生产成本及人们对环保要求不断增强的前提下,汽车零部件的轻量化成为必然的发展趋势。发动机是汽车的核心部分,不同的发动机类型决定了汽车的最终性能,连杆作为发动机的五大关键零部件(缸体,缸盖,曲轴,连杆,凸轮轴)之一,是连接发动机活塞与曲轴的一个重要零件,工作中承受巨大的冲击力和交变应力,其质量、硬度和刚度对发动机的性能有重要影响<sup>[1]</sup>,其制造直接影响了整车性能,因此对连杆的制造工艺提出了较高的要求<sup>[2]</sup>。

连杆的设计与生产过程的高质量、高效率、低成本、低能耗是提高产品竞争力的主要途径,在保证连杆性能要求的前提下,应尽可能简化其加工工艺、减轻重量、提高材料利用率<sup>[3]</sup>。为实现上述目的,传统连杆加工工艺在此方面已经无计可施,因此加工工艺的变革成为必然的发展趋势和发展方向。许多新工艺打破常规,以构思新颖、经济和社会效益显著为特点应运而生,满足了现代企业发展的要求。连杆裂解加工新工艺是 20 世纪 90 年代初发展起来的一种连杆加工新技术,该新工艺从根本上改变了传统的连杆加工方法,是对传统连杆加工的一次重大变革,具有十分显著的经济效益和社会效益<sup>[4]</sup>。

连杆裂解加工技术有三道关键工序:加工裂解槽、裂解、定扭矩装配螺栓。连杆裂解中的大头孔初始裂解槽加工方法对整个连杆裂解加工过程非常重要,是裂解加工的核心技术之一。裂解槽的加工方式主要有三种:机械拉削加工、线切割加工和激光加工。线切割加工的生产效率低,仅适用于产品试制阶段;拉削裂纹槽时,由于裂解材料多硬度较高,因此刀具磨损较快,加工过程中拉刀容易钝化,使裂解槽应力集中系数逐渐降低,裂解缺陷率将有所提高<sup>[5]</sup>。激光加工具有切缝窄、速度快、无刀具磨损、易裂解、重复精度高的特点。连杆裂解槽属于窄缝盲槽,槽面质量要求高,一般

选用 Nd:YAG 固体激光切割器加工裂解槽<sup>[6-8]</sup>。

## 2 摇头机构介绍

在国外,连杆裂解槽激光加工技术正在被广泛应用。其中德国 ALFING 公司的激光裂解设备是目前世界上较为先进的连杆裂解加工设备<sup>[9]</sup>。在国内,吉林大学锻锻所对裂解工艺进行了深入的研究,并且开发了裂解专用装备,图 1 为该所设计的连杆裂解槽激光切割机床,该机床选用德国 TRUMPF 公司生产的 HL62P 大功率 Nd:YAG 固体激光器。

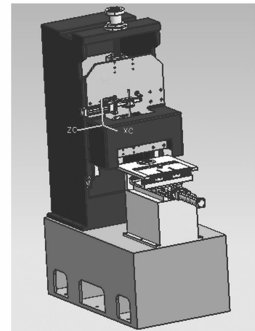


图 1 连杆裂解激光切割机床机械结构

Fig. 1 Structure of laser cutting fracture splitting notch machine

连杆大头中心处两侧都需要进行切槽加工,见图 2,根据连杆自身大头孔径和厚度特点,激光头无法垂直于内孔壁进行切割,需转一角度进行切割,一般为  $30^\circ$  左右,因此连杆裂解激光加工装置需有专用的激光头摆动机构,用来完成激光头的转动。激光头摆动过程及要求:

激光头要求在 1 s 内由垂直位置转动到同  $z$  轴成  $30^\circ$ ,如图 2 所示的激光头实线显示位置,当转动完成稳定后,激光头喷嘴前端口在  $x$  轴方向的微动值要求在  $\pm 0.02$  mm 范围内,完成一侧裂解槽 AB 的切割,切完上升至初始位置后,需再转一个角度,转到图 2 虚线位置后,下行切另一侧的裂解槽 CD。

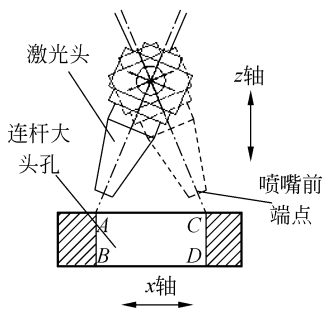


图 2 激光头摆动示意图

Fig. 2 Sketch map of laser cutting head asway mechanism

国际上连杆裂解槽激光切割机床一般采用两种摆头方式,分别为齿轮齿条式和直线轴承组合式,这两种机构是将油缸的直线运动转换为旋转运动,驱动激光头转动,为保证转动角度的精确性,都要有机械挡块进行精确限位,这样就不可避免的会产生振动和冲击,所以这两种摆头方式对液压参数的选择非常关键。

本文完成了油缸驱动直线轴承组合式摆头机构的动力学仿真,并对这种摆头机构进行了物理样机试验,同时提出了伺服电机驱动的摆头方案,对改进的摆头机构进行了运动学仿真,希望为连杆初始裂解槽激光切割机床的参数优化及结构改进提供可靠的理论依据。

### 3 摆头机构动力学仿真

直线轴承组合式摆头机构将直线运动转换为圆周运动,驱动激光头转动,完成摆头动作,驱动部件为液压缸,具体结构如图 3 所示,吉林大学

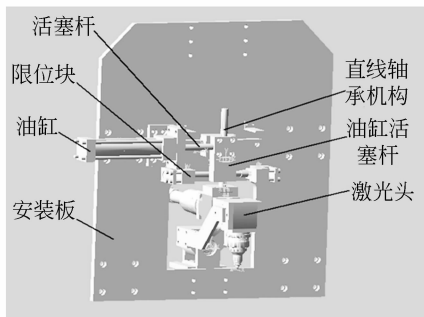


图 3 摆头机构 Adams 模型

Fig. 3 ADAMS model of asway mechanism

辊锻所目前设计的连杆裂解槽激光切割机床的激光头摆动机构采用了这种方案。

### 3.1 模型建立

#### 3.1.1 几何建模

建立 UG 三维图,经刚体处理、模型转换,将 UG 模型导入 MSC. ADAMS 软件中,在激光头喷嘴前端建立 Marker-M 点。

#### 3.1.2 施加约束

油缸与活塞杆之间为直线运动副,活塞杆与直线轴承之间为直线运动副。激光头与直线轴承之间为转动副。激光头与固定件为转动副。将不动部件施加固定副。施加运动约束后的模型如图 3 所示。

#### 3.1.3 施加载荷

直线轴承组合式摆头机构需施加液压驱动力,本文应用 ADAMS/Hydraulics 模块建立液压系统,施加液压驱动力,同时需要在活塞杆及直线轴承与限位块之间施加 solid to solid 接触力<sup>[10]</sup>。

#### 3.1.4 液压系统建模

加载 Hydraulics 模块<sup>[11]</sup>,分别对工作介质、体积容器、压力源、换向阀、单向节流阀和液压缸进行建模,联接元器件,设置各个元件的工作参数,其中液压油缸缸径为 40 mm,建好的液压系统模型如图 4 所示。

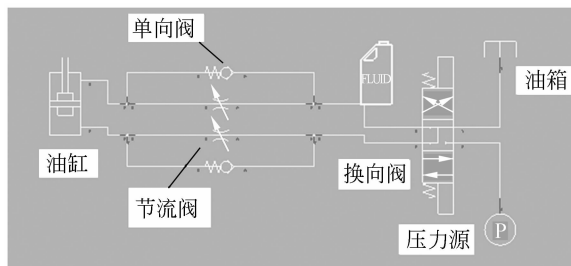


图 4 液压系统建模

Fig. 4 Modeling of hydraulic system

### 3.2 液压参数选择

为降低激光切割机床的工作节拍,要求摆头的工作时间短(一般在 1 s 以下),并且要避免产生大的冲击载荷,本文对液压压力和节流阀工作参数进行联合选择,确保摆头机构的摆头速率快,且冲击载荷小。

#### 3.2.1 液压压力选择

在节流阀的流量系数为 1 的条件下,选择液

压压力分别为 1.5、2.5、3.5、4.5 和 5.5 MPa, 进行摆头仿真, 得到活塞杆与限位块之间的接触力值, 绘成曲线, 如图 5 所示, 从图中得知, 接触力与液压压力基本呈线性关系, 即随液压压力增大, 接触力增大, 所以避免产生大冲击, 应选用较小的液压压力, 本文选用 2.5 MPa 为摆头机构的工作压力。

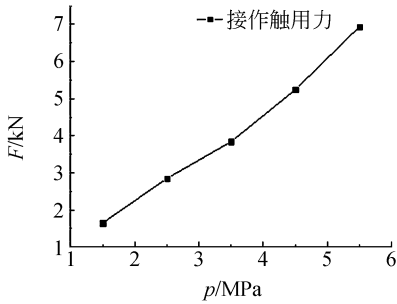


图 5 液压压力与接触力关系曲线

Fig. 5 Relation curve between hydraulic pressure and contact force

### 3.2.2 节流阀系数选择

在液压压力为 2.5 MPa 条件下, 调整节流阀的流量系数, 分别取流量系数为 0.1、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0, 进行摆头仿真, 获得激光头摆头时间, 将数据绘成曲线, 如图 6 所示, 从图中得知, 随流量系数的增加, 摆头过程所用时间减少, 但流量系数超过 0.4, 摆头时间减少量很少, 摆头时间维持在 0.2~0.4 s 之间, 速度增加会导致限位接触力增大, 冲击大, 综合考虑, 节流阀流量系数选用 0.2, 摆头时间大约为 0.64 s。

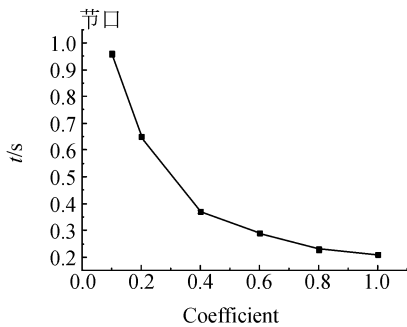
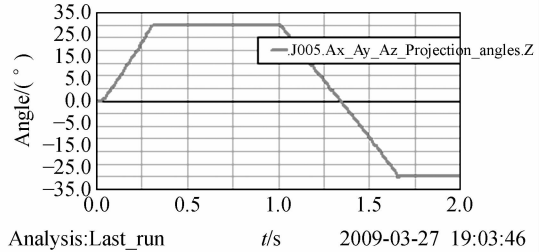


图 6 节流阀流量系数与摆头时间关系曲线

Fig. 6 Relation curve between throttle valve's discharge coefficient and asway time

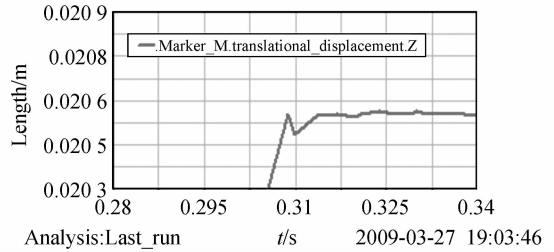
### 3.3 摆头过程仿真

在液压压力为 2.5 MPa, 节流阀流量系数为 0.2 的条件下, 设定仿真时间为 2 s, 仿真步骤为 200 步, 进入后处理模块<sup>[12]</sup>, 确定激光头的摆动角度, 根据摆动角度, 调整限位块的位置, 最后确保激光头摆动角度为 30°, 此时得到的仿真数据如图 7 所示。



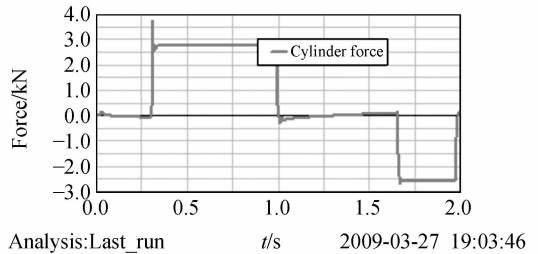
(a) 激光头摆动角度时间曲线

(a) Relation curve between asway angle of LCH and time



(b) Marker-M 位移时间曲线

(b) Relation curve between displacement of Marker-M and time



(c) 油缸作用力时间曲线

(c) Relation curve between cylinder force and time

图 7 液压驱动摆头机构仿真数据

Fig. 7 Simulation data of hydraulic-driven asway mechanism

从图 7 中可知,油缸驱动直线轴承组合摆头机构工作原理可行,能完成要求的摆头动作,由垂直状态摆到左切割位置大约需要 0.3 s,摆动的角度为  $30.08^\circ$ ,从图 7(b)可知水平滑块接触右限位块后瞬间,Mark-M 在  $x$  轴(水平)方向变化 0.02 mm,0.1 s 后趋近一固定值,说明限位过程迅速且准确,图 7(c)可知限位平稳后产生的接触力约为 2.5 kN。

## 4 摆头机构物理试验

物理样机采用油缸驱动直线轴承组合式摆头机构,图 8 为激光头摆动机构照片,根据仿真结果,实际液压油缸的压力设置为 2.5 MPa,节流阀流量系数约为 0.2,本文完成了激光头摆动位置检测试验和连杆切割试验。



图 8 激光头摆动机构照片

Fig. 8 Photo of laser cutting asway mechanism

### 4.1 激光头摆动位置检测试验

#### 4.1.1 摆动角度检测

利用万能角度尺,将激光头分别摆到左侧限位位置和右侧限位位置,摆动到左侧限位位置时,测得激光头摆动角度为  $30^\circ 22'$ ,摆动到右侧限位位置时,测得激光头摆动角度为  $-30^\circ 13'$ ,检测结果表明,左右摆动角度大致相同,若左右摆动误差大,将严重影响裂解槽槽深和槽宽尺寸及公差。

#### 4.1.2 限位位置检测

将激光头摆至左侧限位位置,利用千分表检测限位块限定的水平活塞杆滑块位置,反复摆头数次,测得左侧水平滑块限位后  $x$  轴坐标值变化范围在  $\pm 0.02$  mm 内;同样操作,测得右侧水平滑块限位后  $x$  轴坐标值变化范围也在  $\pm 0.02$  mm 内,说明在 2.5 MPa 的液压压力下,限位装置能

够精确限位。

### 4.2 切割调整及试验

切割工艺要求:

裂解槽深: $0.5 \pm 0.05$  mm;裂解槽宽: $0.2 \pm 0.02$  mm;

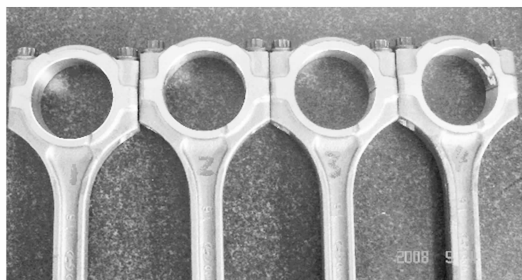
#### 4.2.1 切割调整

由于限位块装配位置误差和其它累计误差影响,在左侧限位位置和右侧限位位置时,导致激光头转动的角度不完全相同,两个位置的激光头喷嘴前端的  $z$  轴坐标也不同,根据实际切割效果调整起始切割位置,确保开始切割点均落在大头孔的倒角上,避免对后续加工产生影响。

根据连杆大头孔左右侧裂解槽的深度和宽度,调整连杆内孔与左右位激光头喷嘴  $x$  向的距离,对切割程序进行修正,直至切割的质量较好,固化切割程序。

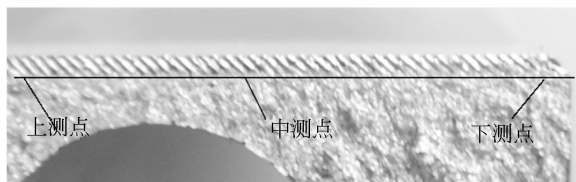
#### 4.2.2 切割试验

在同一激光参数(峰值功率 2.6 kW,脉冲时间 0.3 ms,频率 55 Hz)条件下,应用摆头机构进行大批量切割试验,随机挑选 4 根连杆样品,如图 9(a)所示,依次检测样品的槽深及槽宽,得到具体数据如表 1 所示,根据图表数据得知,连杆样品的



(a) 激光切割试验样品

(a) Samples for laser cutting experiment



(b) 激光切割的连杆大头孔裂解槽

(b) Laser cutting FS notch of connection rod big end

图 9 激光切割试验图片

Fig. 9 Photos of laser cutting test

槽深和槽宽均不超差,即裂解槽满足切割工艺要求,说明摆头机构左右摆动误差小。图 9(b)为切割后并裂解开的连杆大头孔截面,从图中可知,激光脉冲打孔的深度基本均到达图中横线位置,说明切割槽的深度均匀,切割效果较好。

表 1 连杆样品槽宽及槽深

Tab.1 Groove depth and width of connection rod samples

连杆样品	连杆 1		连杆 2		连杆 3		连杆 4	
	左侧	右侧	左侧	右侧	左侧	右侧	左侧	右侧
槽 上	0.54	0.50	0.50	0.49	0.53	0.51	0.46	0.51
深 中	0.51	0.49	0.51	0.48	0.50	0.47	0.49	0.53
(mm) 下	0.47	0.48	0.46	0.55	0.49	0.46	0.47	0.53
槽宽(mm)	0.21	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.19	0.20

经位置检测试验和切割试验验证,在合适的切割工艺参数条件下,限位机构限位准确,直线轴承组合式摆头机构工作稳定、可靠。

### 5 改进摆头机构运动学仿真

由于液压驱动及限位挡块的原因,不可避免会产生冲击和振动。若要调整激光头的摆动角度,需调整限位挡块的位置,这样调整摆动角度会较复杂,本文在原设计的基础上,对液压驱动直线轴承组合摆头机构进行了改进设计,利用伺服电机加滚珠丝杠的形式代替液压缸,对改进的摆头机构进行运动学仿真,意在改进的摆头机构的工作原理的可行性进行验证。

模型建立过程同前,不在赘述,建好的 Adams 模型如图 10 所示,滚珠丝杠的导程为 5 mm。

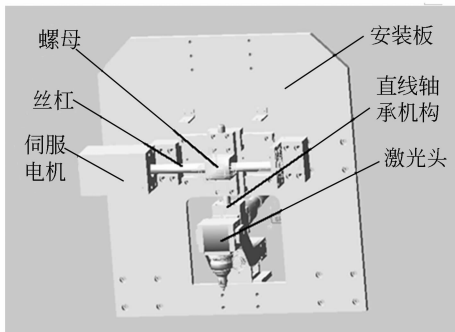
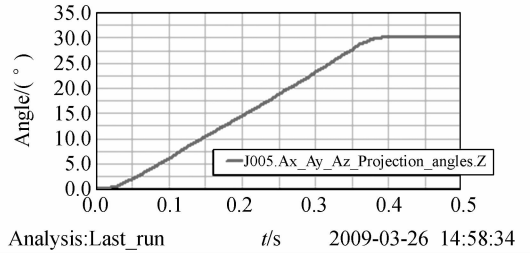


图 10 改进摆头机构 Adams 模型

Fig.10 Adams model of improved asway mechanism

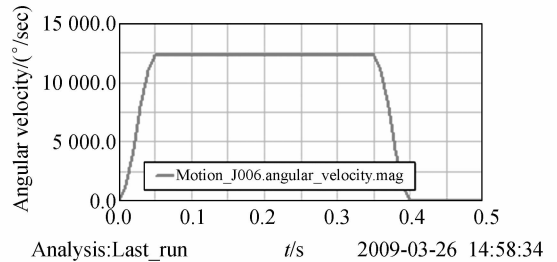
摆头过程起步阶段,伺服电机要提供大扭矩,要求转速低,中间过程保持较高转速,最后阶段要减速,逐渐停止,即要对伺服电机转动速度进行优化,使摆头机构摆动时间较短。

设定仿真时间为 0.5 s,仿真步骤为 200 步,仿真具体数据如图 11 所示。



(a) 激光头摆动角度时间曲线

(a) Relation curve between asway angle of LCH and time



(b) 伺服电机转动速度时间曲线

(b) Relation curve between servo electromotor velocity and time

图 11 伺服电机驱动摆头机构仿真数据

Fig.11 Simulation data of servo electromotor driven asway mechanism

从图中可知,改进后的摆头机构原理可行,在 0.4 s 内完成转动,激光头转动角度为 $30.008^\circ$ ,优化后的中间过程速度保持为 34 r/s,平均转速为 23 r/s,改进后物理样机摆头速度的优化可由代码语句实现<sup>[13]</sup>,改进的摆头机构具有如下优点:

- (1) 工作过程迅速,精度高;
- (2) 调整激光头转动角度容易,只需更改程序语句;
- (3) 不产生振动和冲击,没有环境污染。

## 6 结 论

确定了摆头机构最佳的液压压力为 2.5 MPa,最佳的节流阀流量系数为 0.2,仿真结果表明,直线轴承组合式摆头机构方案可行,能达到激光头摆头机构的设计要求,这在物理切割试验中得到了验证。经位置检测试验和切割试验验证:在合适的切割工艺参数条件下,油缸驱动直线轴

承组合摆头机构工作稳定、可靠,但是摆动角度的调整相对困难。改进的摆头机构工作原理可行,能完成基本摆头动作,转动角度更加精确,且转动角调整更为方便,因此改进后的摆头机构是连杆裂解槽激光切割机床激光头摆动机构较理想的方案。

致谢:本文物理样机试验得到了承德苏垦银河连杆股份有限公司的大力协助,在此表示衷心的感谢。

## 参考文献:

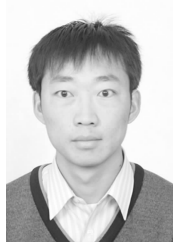
- [1] 徐红光,蒋素琴. 发动机连杆制造材料及特点分析[J]. 天津汽车,2002,29(1):28-29.  
XU H G, JIANG S Q. An analysis of material and its characters of automobiles engine connecting rod[J]. *Tianjin Motor*, 2002, 29(1): 28-29. (in Chinese)
- [2] 陈家瑞. 汽车构造[M]. 北京:机械工业出版社,2001:24-40.  
CHEN J R. *Motor Structure*[M]. Mechanical Engineering Press, 2001:24-40. (in Chinese)
- [3] 田其铸. 汽车构造[M]. 哈尔滨:哈尔滨出版社,1997:13-21.  
TIAN Q ZH. *Motor Structure*[M]. Harbin: Harbin Press, 1997:13-21.
- [4] 杨慎华,寇淑清,谷铮巍,等. 发动机连杆裂解加工新技术[J]. 哈尔滨工业大学学报,2000,12(3):129-131.  
YANG SH H, KOU SH Q, GU ZH W, et al.. Fracture splitting processing of engine connecting rod[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2000, 12(3): 129-131. (in Chinese)
- [5] 杨慎华,张志强,寇淑清. 预制裂解槽加工方法对连杆裂解加工质量的影响规律[J]. 内燃机工程,2008,29(10):80-84.  
YANG SH H, ZHANG ZH Q, KOU SH Q. Influence of starting notch processing methods on fracture splitting quality of connecting rod[J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2008, 29(10): 80-84. (in Chinese)
- [6] YILBAS B S. Laser cutting quality assessment and thermal efficiency analysis[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 155-156: 2106-2115.
- [7] USOV S V, MINAEV I V. High-power impulse YAG laser system for cutting, welding and perforating of super hard materials[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 149: 541-545.
- [8] GEORGE LOISOS, MOSES A J. Effect of mechanical and Nd:YAG laser cutting on magnetic flux distribution near the cut edge of non-oriented steels[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, 161: 151-155.
- [9] 刘文忠. ALFING 激光裂解设备的应用[J]. 汽车工艺与材料, 2005, 20(11): 11-13.  
LIU W ZH. Alfing laser cracking equipment application[J]. *Automobile Technology & Material*, 2005, 20(11): 11-13. (in Chinese)
- [10] 李增刚. ADAMS 入门详解与实例[M]. 北京:国防工业出版社, 2006: 91-93.  
LI Z G. *Introduction and Example of ADAMS* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006: 91-93. (in Chinese)
- [11] 王国强,张进平,马若丁. 虚拟样机技术及其在 ADAMS 上的实践[M]. 西安:西北工业大学出版社, 2002: 165-182.  
WANG G Q, ZHANG J P, MA R D. *Virtual Prototype Technology and Practices Based on ADAMS*[M]. Xi'an: Press of Northwestern Polytechnical University, 2002: 165-182. (in Chinese)
- [12] 郑建荣. 虚拟样机技术入门与提高[M]. 北京:机械工业出版社, 2005: 93-108.  
ZHENG J R. *Introduction and Advance of Virtual Prototype Technology* [M]. Beijing: Mechanical engineering press, 2005: 93-108. (in Chinese)
- [13] 林宝君,杨慎华,郑祺峰,等. 发动机连杆裂解槽激

光加工机床的加减速控制[J]. 光学精密工程, 2008,16(10):1922-1927.

LIN B J, YANG SH H, ZHENG Q F, et al.. Acceleration and deceleration controls of laser pro-

cessing machine for connecting rod fracture splitting notch in engine[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(10):1922-1927. (in Chinese)

#### 作者简介:



**郑黎明**(1983—),男,山东沂南人,博士研究生,2005年,2007年于吉林大学分别获得学士、硕士学位,主要从事发动机关键部件先进加工技术与装备、多体动力学等方面的研究。E-mail: dayan\_zlm@yahoo.com.cn



**杨慎华**(1949—),男,吉林长春人,教授,博士生导师,吉林大学锻工工艺研究所副所长,主要从事精密加工技术与装备、发动机关键部件先进加工技术与装备等方面的研究。E-mail: shenhua@jlu.edu.cn



**郑祺峰**(1977—),男,黑龙江伊春人,博士研究生,助教,1999年于吉林大学获得学士学位,主要从事精密加工技术与装备方面的研究。E-mail: zhengqf@jlu.edu.cn

#### 通讯作者:



**邓春萍**(1950—),女,吉林长春人,副教授,主要从事精密加工技术与装备、发动机关键部件先进加工技术与装备等方面的研究。E-mail: dengcp@jlu.edu.cn

#### ● 下期预告

## 轴对称飞行器滚转稳定控制与舵机技术指标

张 跃,段 镇

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033)

结合捷联惯性导航技术,系统研究了舵机技术指标对滚转自动驾驶仪性能的影响。根据滚转回路特性,分析了滚转回路截止频率与舵机带宽的基本关系;应用频域分析,在低阶简化模型和高阶模型性能比较基础上,研究了舵机带宽和相角对滚转回路性能的影响。以二阶系统阶跃响应形式,联系飞行操纵产生的下洗流干扰力矩与滚转稳态指令,确定了舵的最大偏转角速度,保证滚转自动驾驶仪在机动飞行下工作在线性区;另外,综合考虑有转速和角度限制的二阶系统舵机模型及不同总攻角下的最大干扰力矩等因素,考查饱和非线性区中滚转回路指令和滚转角的响应状态,论证滚转回路稳定性。结果表明:对于弹体滚转时间常数为 0.3 s,舵效率力矩为  $42 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{rad}$ ,带宽要求大于  $50 \text{ rad/s}$  的滚转自动驾驶仪,舵机带宽应不小于 20 Hz、阻尼比在 0.6 以上。该项研究提供了滚转自动驾驶仪设计时确定舵机技术指标的一种基本方法。