

图 4.15 主轴进给系统模型的单元化处理

有限元分析法中对模型加载极限载荷, 得到了主轴进给模型的应力分布。如图 4.16 所示。该模型应力最大点存在于轨道与轨道固定架的连接点, 该处的英里大小为, 该应力不足以使模型发生断裂, 所以是安全的。然后对该模型进行变形分析, 查看它的变形是否满足系统的要求。

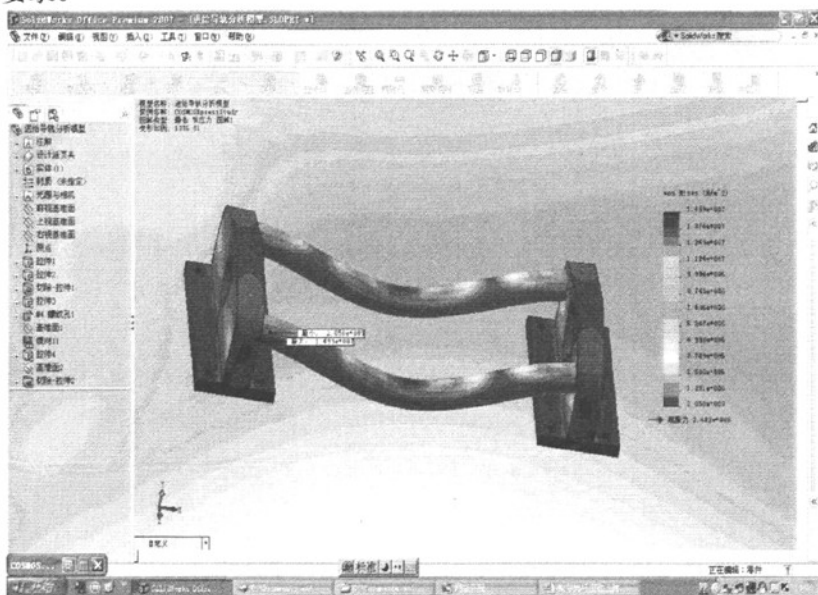


图 4.16 主轴进给系统模型的应力分布

对系统模型的变形进行分析得到图 4.17 所示, 发现模型在加载极限载荷的时候, 变形最大点发生在导轨中间, 发的大小为。该变形量与光纤的最小直径相比是一个可以忽略的量, 加之系统的要求也能够满足, 所以模型变形量满足系统要求。

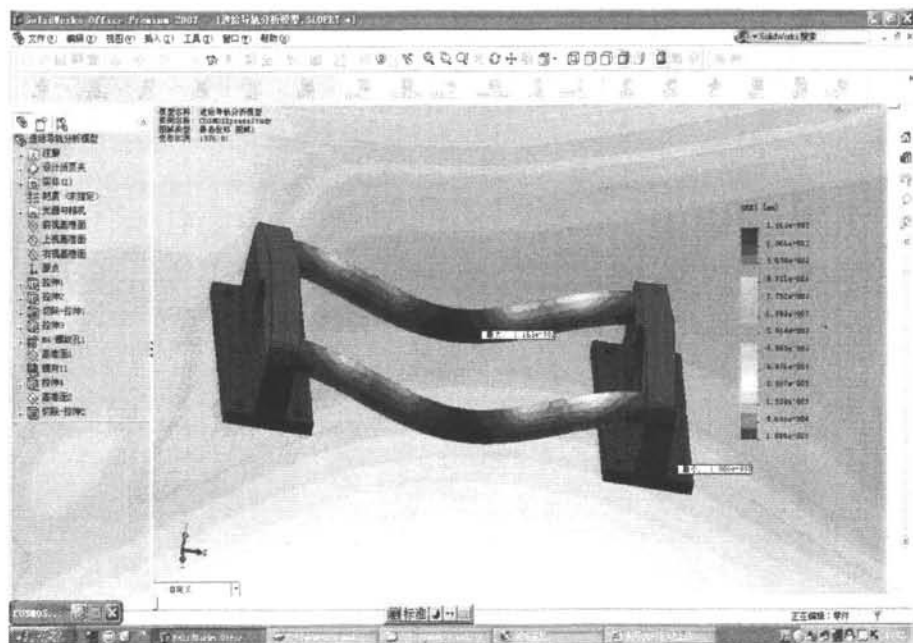


图 4.17 主轴进给系统模型的变形情况

#### 4.1.4 排线嘴进给系统的强度分析

对排线嘴系统进行分析的时候也需要对系统进行简化,排线嘴进给系统可以简化为一悬臂梁和在它上面装载的轨道。

首先,排线嘴进给系统主体进行简化,及简化成一悬臂梁,其模型如图 4.18 所示。

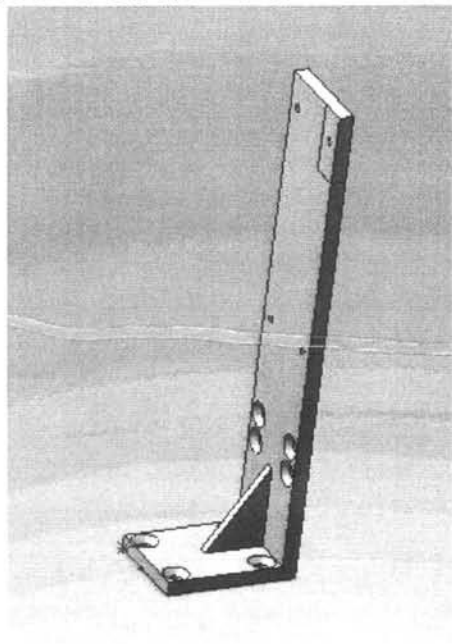


图 4.18 悬臂量模型

对模型进行材料选择。

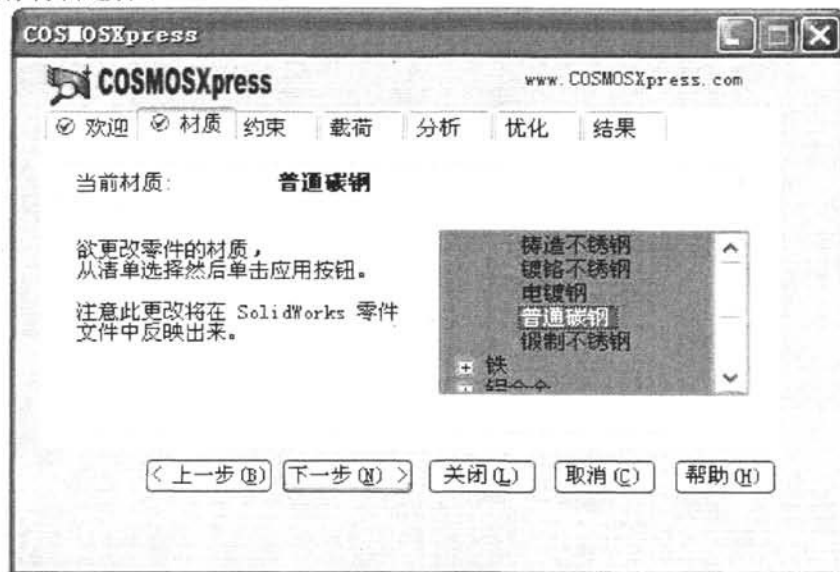


图 4.19 悬臂量材料选择

对悬臂梁模型加载极限载荷，悬臂梁所承受的极限载荷时，它所受到的力为：顶端加载一扭矩并且有一使它弯曲的力的作用。由参数要求可知排线嘴受到的拉力为  $300g$ ，由设计图可知，排线嘴支架到光纤的距离为  $50mm$ 。所以支架理论上受到的力矩为  $0.15Nm$ ，但开路到其他因素，对支架加载  $10Nm$  的载荷，其载荷分布如图 4.20 所示。支架的约束为图 4.20 所示：

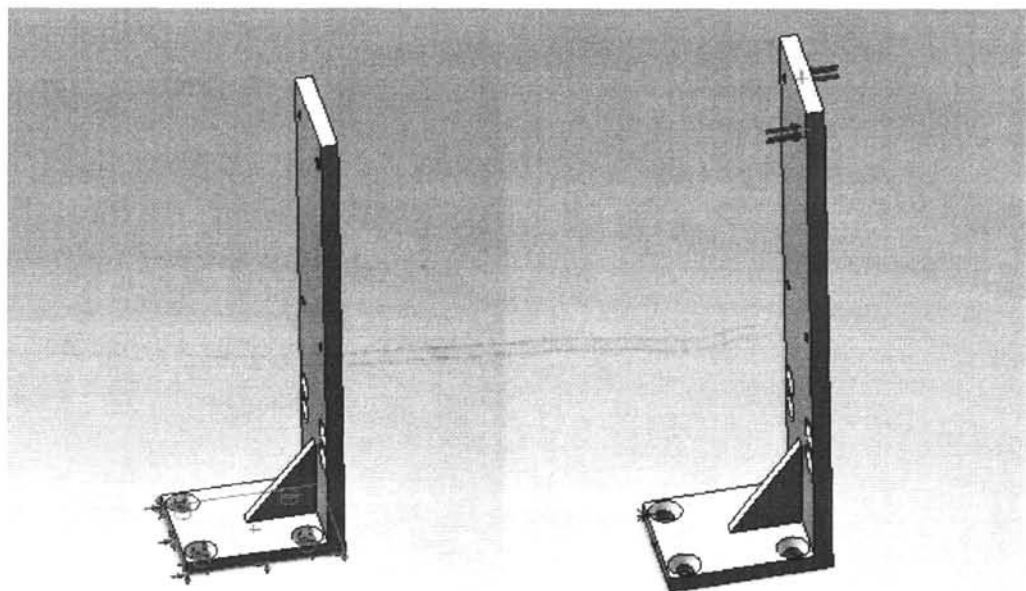


图 4.20 支架受到的约束以及载荷分布

进行有限元分析后，得到的安全系数为 48.0744（由软件计算得到）。表示该悬臂梁结构足够安全。

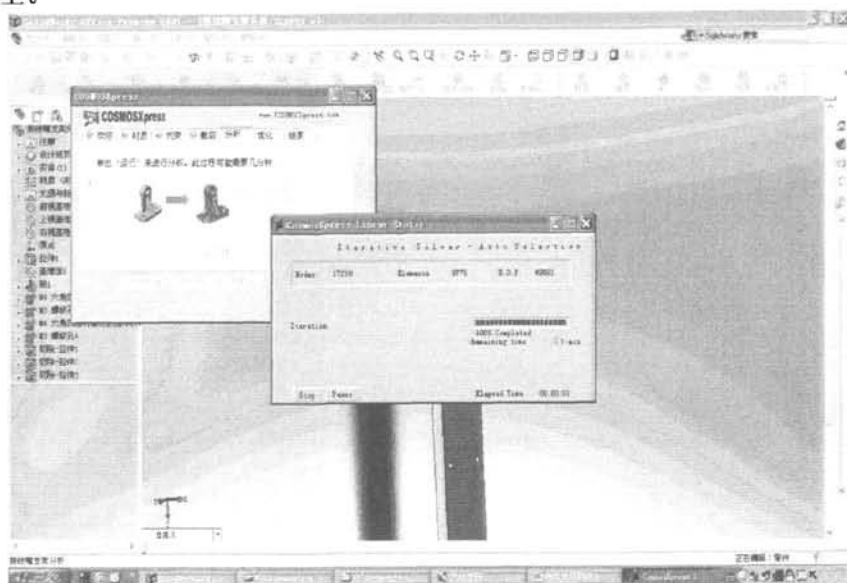


图 4.21 对悬臂梁模型进行单元化

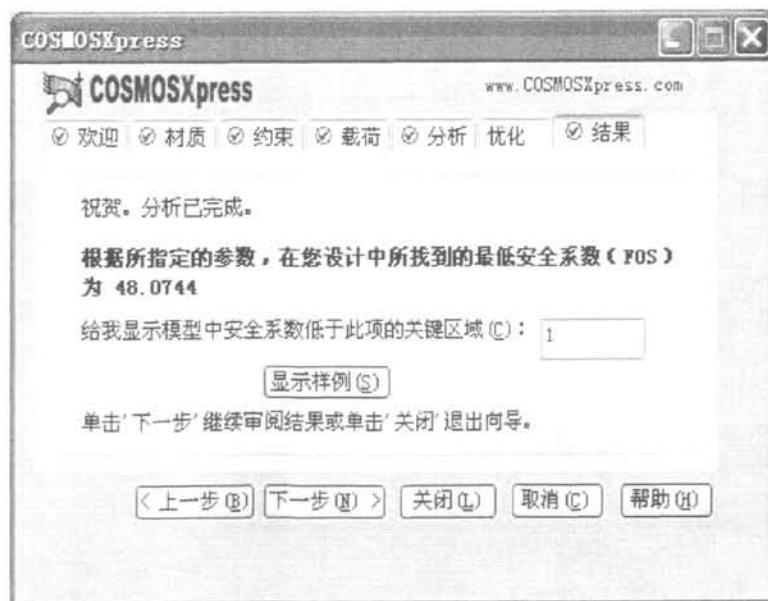


图 4.22 悬臂梁模型安全系数

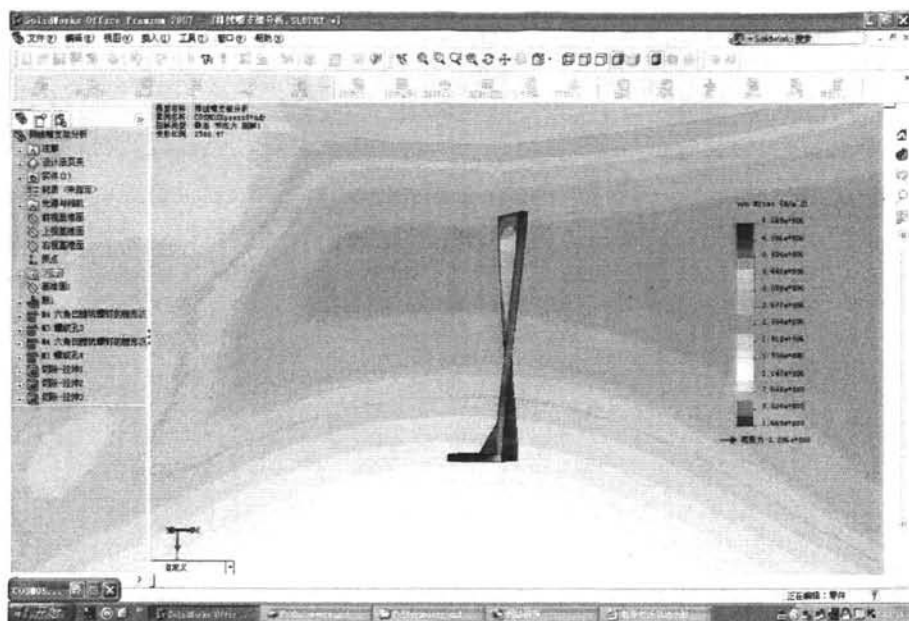


图 4.23 悬臂梁模型的应力分布

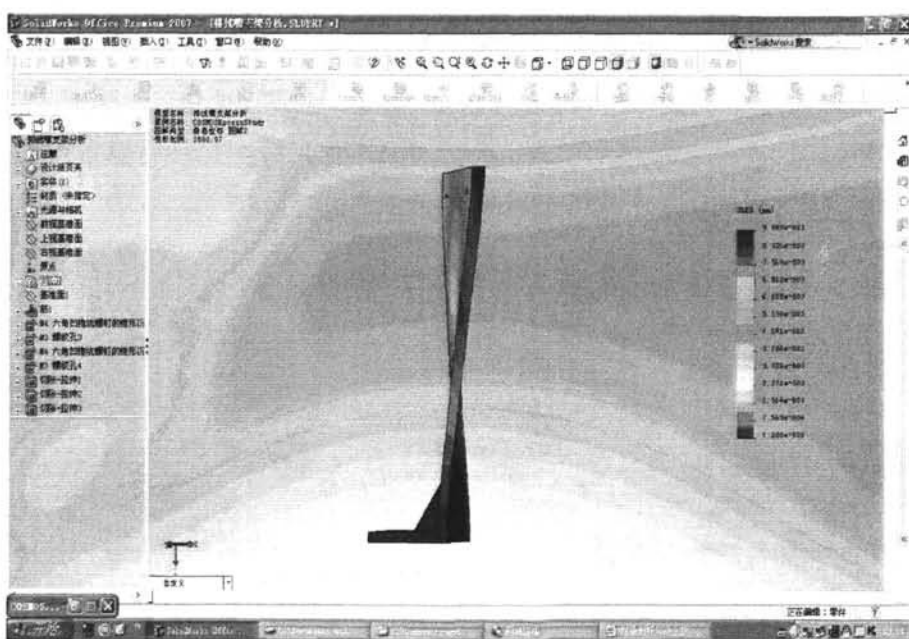


图 4.24 悬臂梁模型的变形情况

对排线嘴系统中的导轨进行简化处理,与主轴进给系统相同得到了一简化的导轨模型进行分析,该模型与主轴进给模型不同的是:在极限载荷时所受的不是压力而是一扭转力矩。

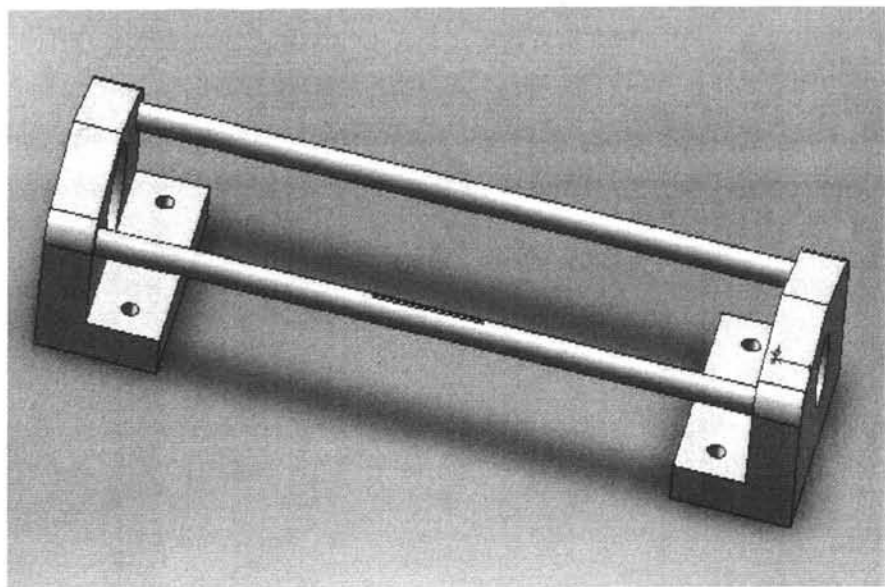


图 4.25 排线嘴轨道模型

对于排线嘴系统简化体，由于塔底部固定在排线嘴支架上，所以约束条件为排线嘴导轨的底座固定，其约束情况见图 4.26 所示，理论上其所受的扭矩与排线嘴支架所受扭矩一样，为  $0.15Nm$ ，但是考虑到可靠性问题，此处分析是加载载荷为  $10Nm$ 。其载荷分布见图 4.26 所示。

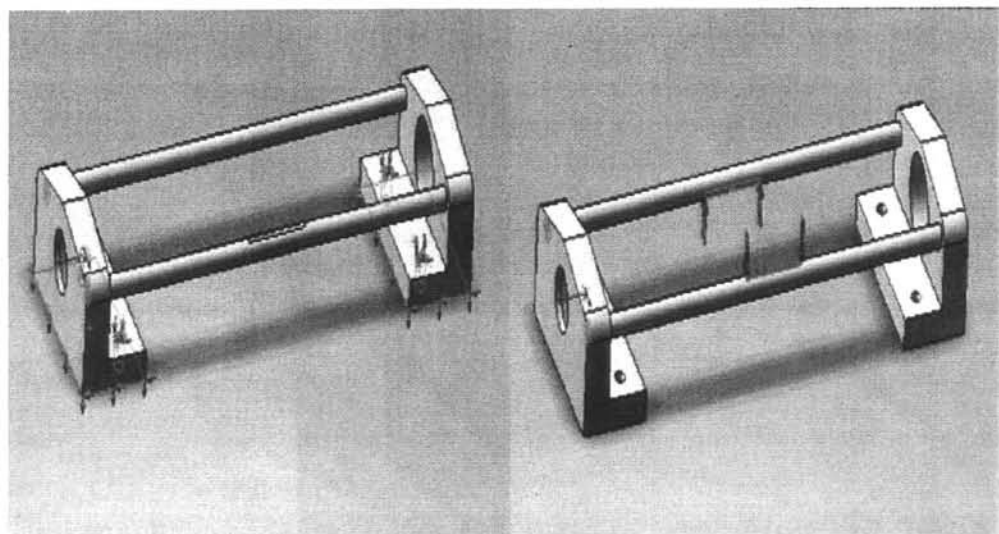


图 4.26 排线嘴简化结构的约束及载荷分布

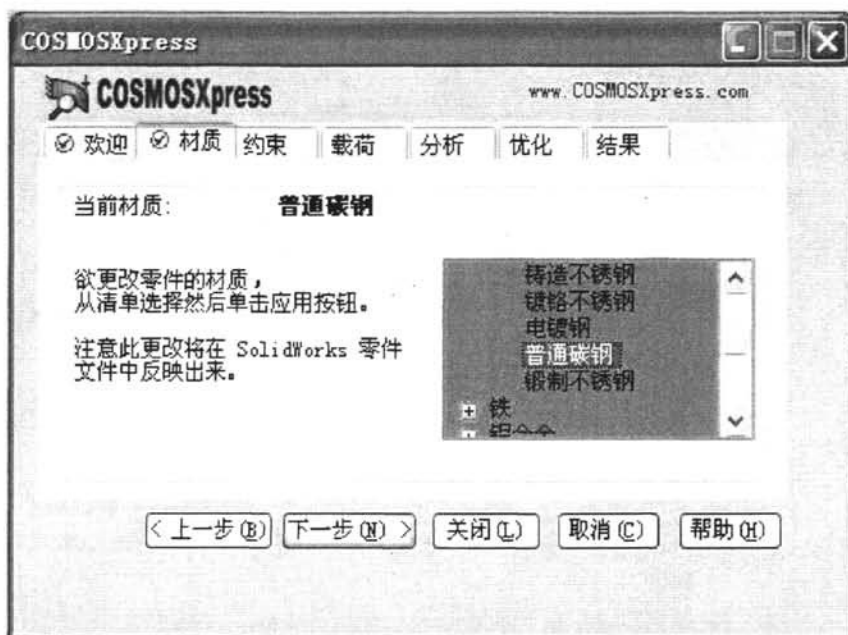


图 4.27 模型材料的选择

在对该模型分析后得到安全系数为 5.1666（由软件计算得到）。虽然比其他几个系统的安全系数低，但是也足以保证该模型的安全，另外系统整体为该处要求较低，所以该出也满足系统的要求。

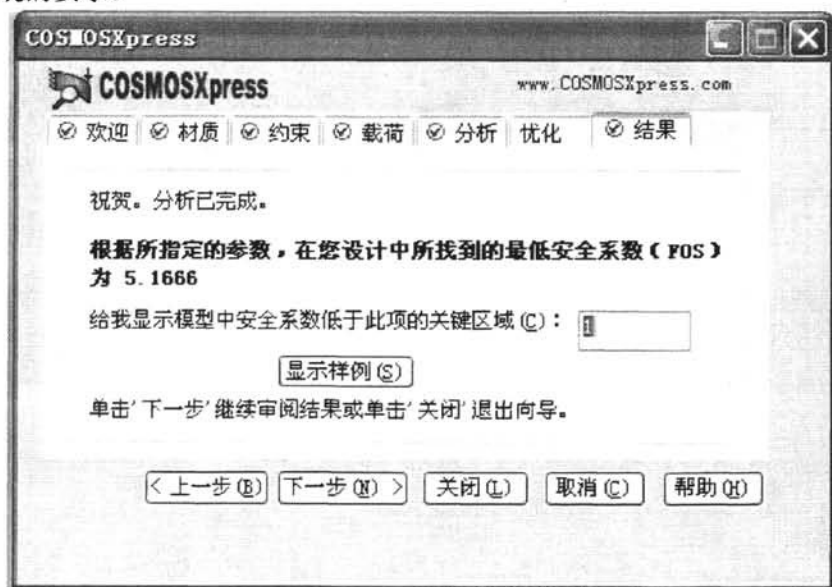


图 4.28 模型的安全系数



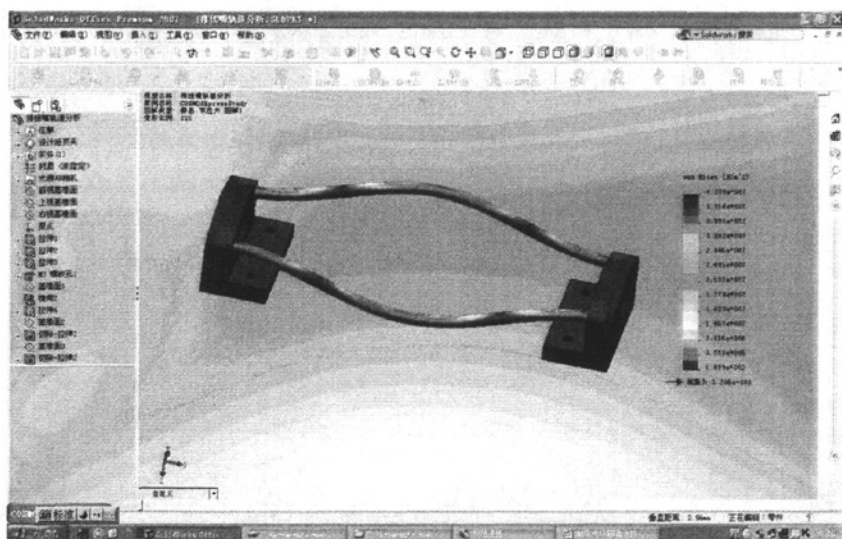


图 4.29 模型的应力分布

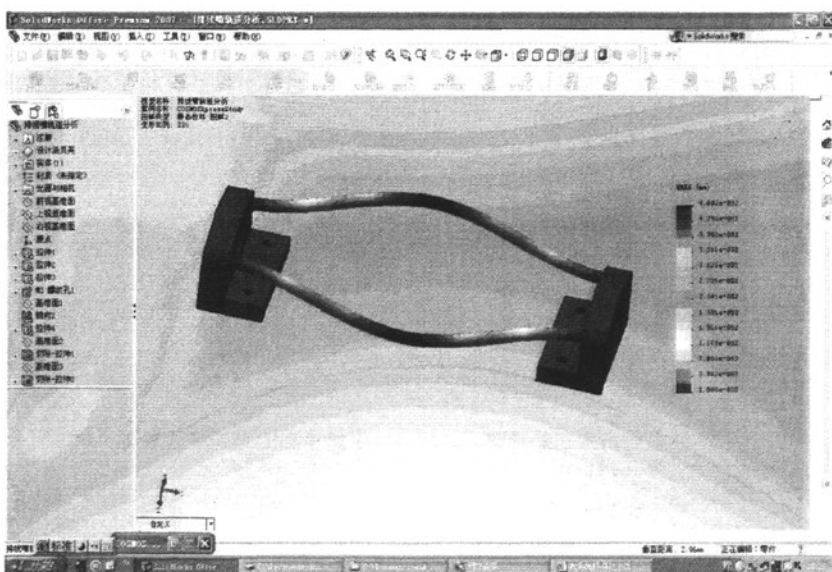


图 4.30 模型的变形情况

#### 4.1.5 压线勾爪的强度分析

压线勾爪在正常运行下只受到光纤对沟槽侧壁的压力,而该里的大小一定小于 300g,所以对压线勾爪分析时,加载的载荷为 15 牛,其约束为固定孔的约束。见图 4.31 所示



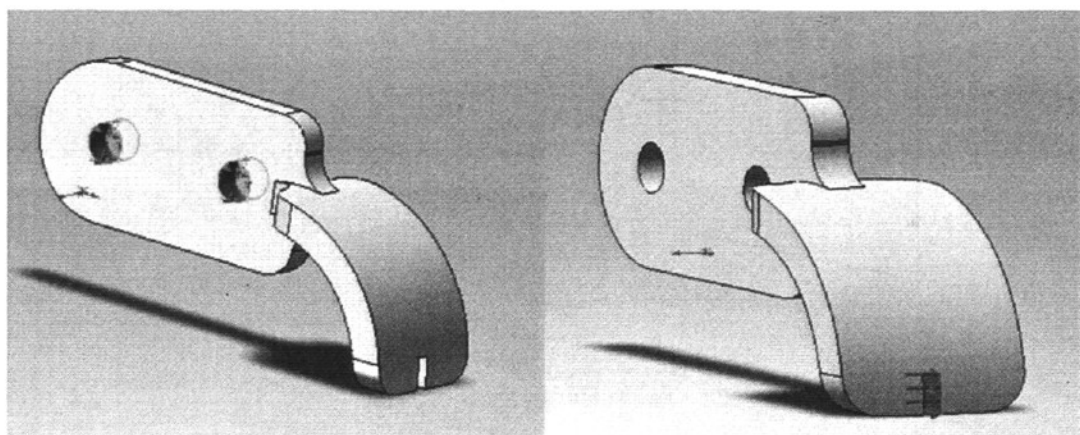


图 4.31 压线勾爪的约束以及在和分布

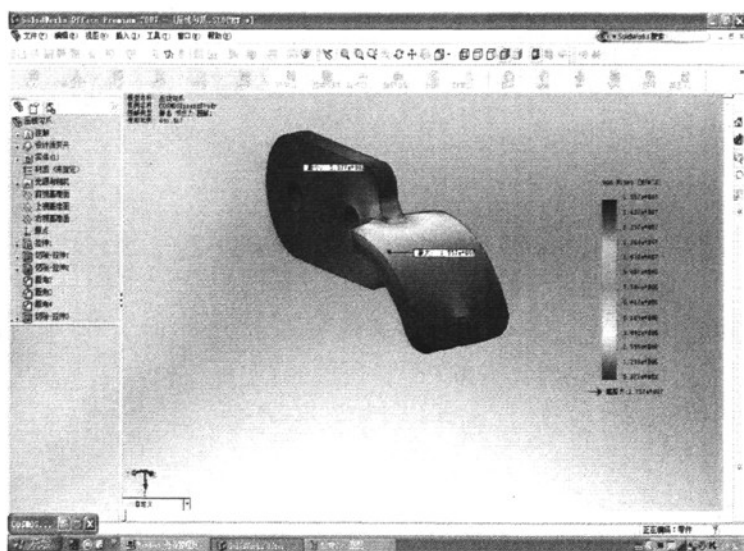


图 4.32 压线勾爪的变形情况

## 4.2 上绕过程的运动学分析

上绕过程是在一层绕线完成后转入下一线层的运动，前面已经分析了发生上绕的条件，现在从运动学方面对整个上绕过程进行分析。以下分析是在主轴匀速转动的前提下进行的。

### 4.2.1 同线层内绕线的运动分析

当主轴匀速转动时，主轴进给运动也是匀速的，主要是分析送纤速度，加速度。因为送纤的速度、加速度直接影响到张力的控制，上绕过程的控制以及自动缠绕机的工作。

首先建立计算在一定时间内送纤的长度  $L$ 。

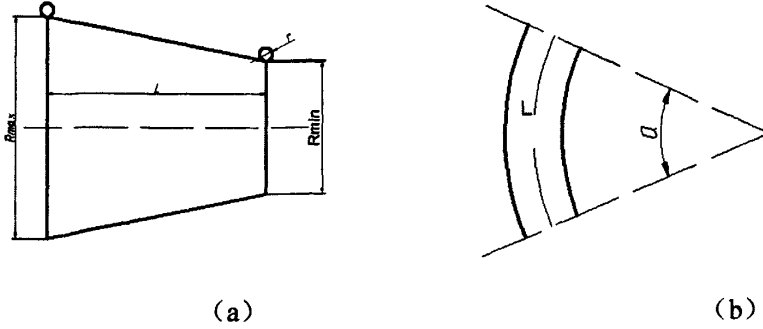


图 4.33 绕线过程分析

如图 4.33 (a) 所示, 在同一线层上光纤的形状是半径逐渐增大的螺旋线, 该线的长度为  $L$ ,

因为

$$L = \int_0^1 R d\alpha \quad (4.1)$$

所以可以求得光纤的长度为:

$$L = \int_0^1 R' d\alpha$$

$\alpha$  为转过的角度, 所以  $\alpha = \omega t$

式中  $R'$  为实时半径, 它的大小为:

$$R' = R_{\min} + \frac{R_{\max} - R_{\min}}{l} \beta \quad (4.2)$$

式中  $2r\beta$  为进给距离,  $\beta = \frac{\omega t}{2\pi}$

量入上式, 可以得到光纤长度为:

$$\begin{aligned} L &= \int_0^1 \left[ R_{\min} + r \frac{\omega t}{\pi} \left( \frac{R_{\max} - R_{\min}}{l} \right) \right] d\omega t \\ &= \int_0^1 \left[ \omega R_{\min} + r \frac{\omega^2 t}{\pi} \left( \frac{R_{\max} - R_{\min}}{l} \right) \right] dt \end{aligned} \quad (4.3)$$

所求计算  $L$  最后的结果为

$$\begin{aligned} L &= \int_0^1 \left[ \omega R_{\min} + r \frac{\omega^2 t}{\pi} \left( \frac{R_{\max} - R_{\min}}{l} \right) \right] dt \\ &= \omega R_{\min} t \Big|_0^1 + \frac{\omega^2 t^2 r}{2\pi} \left( \frac{R_{\max} - R_{\min}}{l} \right) \Big|_0^1 \\ &= \omega R_{\min} t_1 + \frac{\omega^2 t_1^2 r}{2\pi} \left( \frac{R_{\max} - R_{\min}}{l} \right) \end{aligned} \quad (4.4)$$

的到光纤长度后就很容易计算出送纤速度，送纤速度 $v$ 就是

$$v = \frac{dL}{dt_1} \quad (4.5)$$

$$\text{所以 } v = \omega R_{\min} + \frac{\omega^2 t_1 r}{\pi} \left( \frac{R_{\max} - R_{\min}}{l} \right) \quad (4.6)$$

$$\text{那么, 送纤的加速度 } a = \frac{dv}{dt_1} = \frac{d^2 L}{dt_1^2} \quad (4.7)$$

$$\text{所以 } a = \omega R_{\min} + \frac{\omega^2 r}{\pi} \left( \frac{R_{\max} - R_{\min}}{l} \right) \quad (4.8)$$

#### 4.2.2 同线层内绕线运动各参数图绘制

计算时取线芯有效段长度为 $100\text{mm}$ ，有效段大直径为 $17\text{mm}$ ，小直径为 $13\text{mm}$ ，光线直径为 $0.5\text{mm}$ 。由于受到计算量的限制，转速取 $\pi/10\text{rad/s}$ ，计算时步长选择为 $0.1\text{s}$ ，得到的数据绘制曲线图为图 4.34-图 4.36 所示<sup>[32]</sup>。

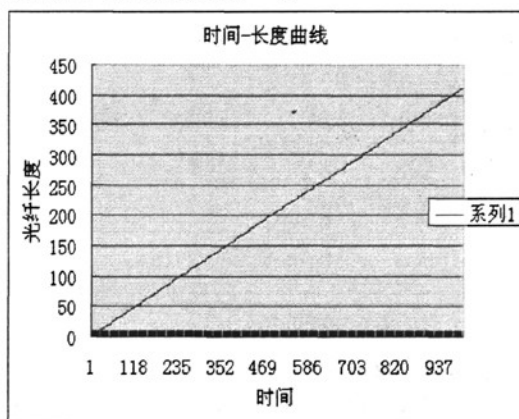


图 4.34 时间-光纤缠绕长度曲线

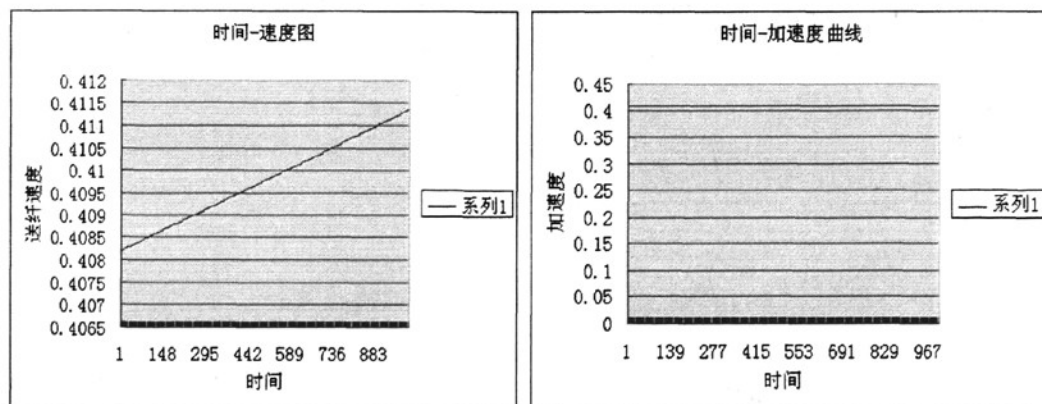


图 4.35 时间-送纤速度曲线

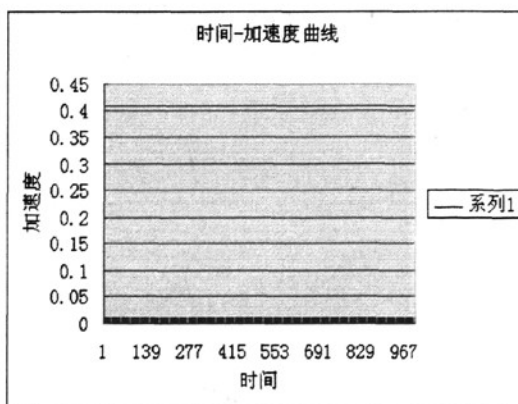


图 4.36 时间-送纤加速度曲线

### 4.2.3 上绕过程分析

上绕过程中主轴的转动速度不变，那么上绕是在一圈中完成的。当转速为最大值时，即  $800r/min$  时。上绕完成的时间为  $t = \frac{1}{\frac{800}{60}} = 0.075s$ 。

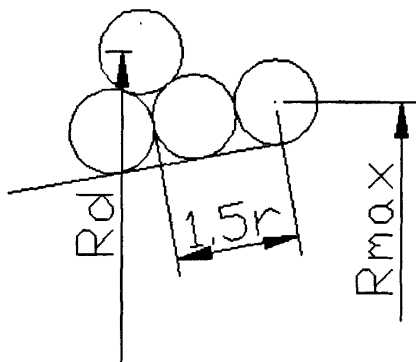


图 4.37 上绕简化模型

由于光纤半径非常小，所以可以近似认为山上绕过程横向通过的距离是  $1.5r$ ，同 4.3.1 节中的问题，计算上绕过程中光纤的长度  $L$ 。

$$\begin{aligned}
 L &= \int_0^{t_2} \left[ R_{\max} - r \frac{\omega t}{\pi} \left( \frac{R_{\max} - R_{\min}}{l} - \frac{\sqrt{3}r}{1.5r} \right) \right] d\omega t \\
 &= \int_0^{t_2} \left[ \omega R_{\max} - r \frac{\omega^2 t}{\pi} \left( \frac{R_{\max} - R_{\min}}{l} - \frac{\sqrt{3}r}{1.5r} \right) \right] dt
 \end{aligned} \tag{4.9}$$

化简求解的到

$$\begin{aligned}
 L &= \omega R_{\max} t_2 - \frac{\omega^2 t_2^2 r}{2\pi} \left( \frac{R_{\max} - R_{\min}}{l} - \frac{\sqrt{3}r}{1.5r} \right) \Big|_0^{t_2} \\
 &= \omega R_{\max} t_2 - \frac{\omega^2 t_2^2 r}{2\pi} \left( \frac{R_{\max} - R_{\min}}{l} - \frac{\sqrt{3}r}{1.5r} \right)
 \end{aligned} \tag{4.10}$$

那么，上绕过程中光纤的速度为

$$\begin{aligned}
 v &= \frac{dL}{dt_2} = \frac{d\omega R_{\max} t_2 - \frac{\omega^2 t_2^2 r}{2\pi} \left( \frac{R_{\max} - R_{\min}}{l} - \frac{\sqrt{3}r}{1.5r} \right)}{dt_2} \\
 &= \omega R_{\max} - \frac{\omega^2 t_2 r}{\pi} \left( \frac{R_{\max} - R_{\min}}{l} - \frac{\sqrt{3}r}{1.5r} \right)
 \end{aligned} \tag{4.11}$$

那么，上绕过程中的送纤加速度为

$$a = \frac{dv}{dt_2} = \frac{d^2 L}{dt_2^2} \quad (4.12)$$

$$a = \frac{\omega^2 r}{\pi} \left( \frac{R_{\max} - R_{\min}}{l} - \frac{\sqrt{3}r}{1.5r} \right) \quad (4.13)$$

#### 4.2.4 上绕过程运动参数图绘制

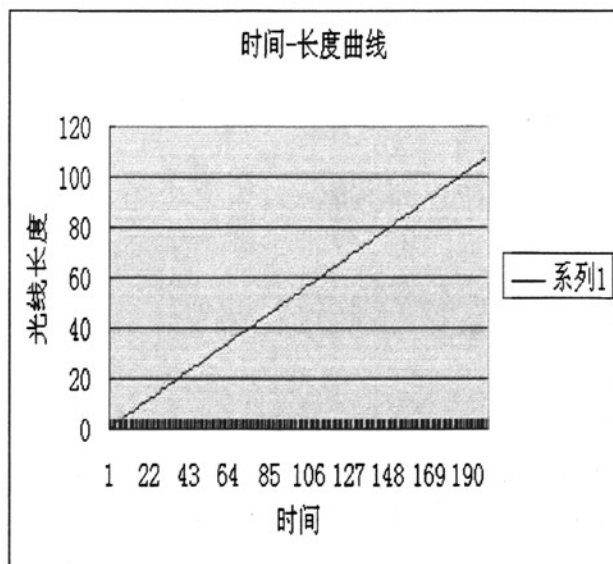


图 4.38 上绕过程中，时间-送纤长度曲线

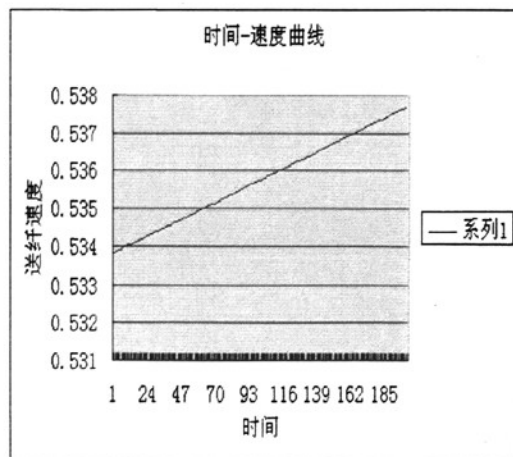


图 4.39 上绕过程中，时间-送纤速度曲线

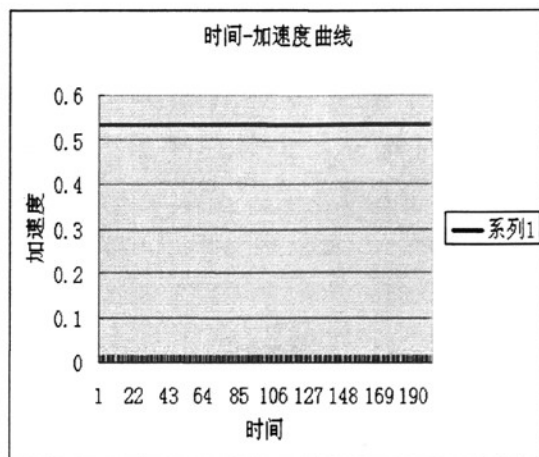


图 4.40 上绕过程中，时间-送纤加速度曲线

图 4.38—图 4.40 是由计算主轴旋转若干圈（包括紧密缠绕，上绕过程）中送纤速度、加速的曲线，图 4.38-图 4.40 是上绕过程中送纤的速度加速度曲线，这些图由 Excel 计算可得。主要用来判断何种方式缠绕时送纤加速度突变最小。

## 5 结论和展望

首先, 本文通过对光纤上绕机构的特殊性分析, 对系统机械特性进行研究。根据光纤缠绕较普通纤维的特殊性及其军事上的高精度要求, 结合电机、测量、传动等学科的知识, 设计了较合理的光纤上绕机构的运动方案。

其次, 在提出了上绕机构的运动方案以后, 综合各种因素从中选择出最优的方案进行机构设计。提出了具体的上绕工作过程和运动流程。设计出上绕机构, 进行上扰时控制量的计算。

再次, 并利用 SolidWorks 进行建模、优化及强度分析, 得到可实现的系统模型。根据机构设计得到上绕过程中运动的曲线。经过运动学分析式系统的准确性和相对稳定性能够满足光纤缠绕的技术要求, 且增强了系统的灵活性和适应能力。

文中已设计了完整的上绕机械机构, 并且具有较好的稳定、准确性。需要一完整且完善的控制系统使得该光纤自动绕线机能够很好的工作。运动分析都是纯理论分析, 所提出的模型是理想状态的模型, 和真实的工作状态还是有一定差别, 要进一步分析上绕过程建立更加完备的体系模型应结合实际工作状态下所有测量参数从新建立模型进行分析计算。本文对上绕过程进行分析, 设计了粗略的过程, 在上绕过程中正常情况的分析, 并未对出错情况进行分析, 也就是说给系统还需要完善出错后的纠错能力, 使得上绕的精度更高。

## 参考文献

- [1] 谭显裕.光纤制导弹技术发展概述[J].火力与指挥控制.2000. 01. 08-13
- [2] 陆永红, 钟生新.光线技术及其军事应用.光电子技术[J]. 2004. 3
- [3] 白木, 周洁, 王泽和.光纤制导弹综述[J].航空兵器. 2003 No. 3
- [4] 刘永昌.光纤制导关键技术分析和研究.应用光学[J]. 1994 第三期
- [5] 林玉琛. 光纤制导技术及其应用和发展[J]. 现代防御技术. 1998 年 5 月
- [6] 崔得东. 光纤制导系统光损耗动态范围测试研究[J]. 弹箭与制导学报. 2003 年
- [7] J .Y. Hung and H.V. White, Precision winding of fiber optic filament, part 2 winding control[J], IEEE Trans. Ind. Electron, to appear, Aug.1992
- [8] Thomas L. De Fazio, "Development issues for optic fiber coil windingAndre Sharon, Development of an automated fiber optic winding machine for gyroscope production[J], Robotics and computer integrated manufacturing,2001
- [9] 廖延彪编著,《光纤光学》[M], 北京: 清华大学出版社. 2002
- [10] 高锟. 光纤系统[M]. 北京: 国防工业出版社. 1994
- [11] 胡君良. 制导光缆线包光附加损耗分析与计算. 应用光学. 1998 年第 6 期
- [12] L.M.Sheppard,"The revolution of filament winding," Advanced Materials & Processes Incorporating Metal Progress,vol.132,no.7,pp.31-35, July 1987
- [13] John Y·Hung and H·Van white, "precision winding of fiber optic filament, part1: winding characteristics, IEEE Trans.Ind.Electron., vol.39, no.3, June 1992.
- [14] 彭吉虎, 吴伯瑜. 光纤技术及应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1995. 6
- [15] 机械工程手册编辑委员.电机工程手册[M].北京: 机械工业出版社, 1982 第 1 卷: 基础理论
- [16] Bobbin Akira Akiyama. Mitsuru Shibata. Shinji Araki A Theory of Unwinding Optic Fiber's Motion for Fiberoptic Data Link and Hiromitsu Ishii Electronics and Communications in Japan, part 1, Vol.85,No.3,2002
- [17] Cyntia Cristina de paula, "Fabrication of glass carbon spools for utilization in fiber optic gyroscopes",Carbon,2002
- [18] K.J.Astrom and B.Wittenmark, Adaptive Control. Reading, 1989
- [19] Roser,"Filament winding,"Modern plastics,vol.66,no.11,pp.309-310,Oct.1990
- [20] J .C .Hung ,C.D. Mabee, and H.V. White, "Development of control subsystems for an automatic fiber winder, "Technical report TR-TG-85-23, U.S. Army Missile Command, Redstone Arsenal, AL,AUG.1985
- [21] 康葳葳. 制导光纤自动缠绕技术.
- [22] John Y·Hung and H·Van white, "precision winding of fiber optic filament, part1: winding characteristics, IEEE Trans. Ind. Electron., vol.39, no.3, June 1992.
- [23] 唐照民, 李质芳, 诸文君等编著.《机械设计》[M].西安: 西安交通大学出版社.20001
- [24] 霍振生主编.《机械技术应用基础: 机械设计四合一》[M].北京: 机械工业出版社.2003
- [25] 孙靖民主编.《现代机械设计方法》[M].哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社.2003
- [26] 李振清主编.《机械设计简明手册》[M].北京: 兵器工业出版社.1993



- [27] 万小利主编.《计算机辅助机械设计》[M].北京:机械工业出版社.2003
- [28] 徐元昌.机电系统设计[M].北京:化学工业出版社,2005,5
- [29] 成大先.机械设计手册:机械传动[M]:单行本.北京:化学工业出版社,2004
- [30] 机械设计手册编委会.机械设计手册[M]:新版.第2卷.北京:机械工业出版社,2004
- [31] 符曦.高磁场永磁式电动机及其驱动系统[M].北京:机械工业出版社,2001.165~187.
- [32] 陆元章主编.现代机械设备设计手册[M](第2卷:机电系统与amp;控制)[M].北京:机械工业出版社,1996.6.
- [33] 张建民等.机电一体化系统设计[M].北京:北京理工大学出版社,1996.1.
- [34] 陈康宁,王馨,李天石.机械工程控制基础[M].西安:西安交通大学出版,1997.11
- [35] 胡寿松.自动控制原理(第四版)[M].北京:科学出版社,2001.2
- [36] 丁志刚.直线步进电动机的原理控制和应用.北京:机械工业出版社,1994.
- [37] 汤蕴廖.电机学-机电能量转换上册[M].北京:机械工业出版社,1981
- [38] 曹承志.电机、拖动与控制[M].北京:机械工业出版社,2000
- [39] 黄诗翘等编译.川北何明著[M](日本)《机械设计中的惯性量 $GD^2$ 》.成都:成都科技大学出版社.1990.
- [40] 江洪编著.《Solid Works2004 基础教程》[M].北京:机械工业出版社.2004
- [41] 杨丽编著.《Solid Works 零件设计》[M]北京:清华大学出版社.2004
- [42] SolidWorks Corporation SolidWorks 2000 API help [Z]
- [43] 谢剑编著《Excel 在建筑工程中的应用:快速计算工具实例》[M].天津:天津大学出版社.2004.

## 攻读硕士学位期间所发表的论文

- 1.张长荣 宁生科 光纤缠绕机自动上绕过程分段和上绕参数计算 机械工程师.
- 2.光纤缠绕机张力控制系统研究 审稿中

## 致 谢

本文是在导师宁生科副教授的悉心指导和热情帮助下完成的。在论文选题、理论学习、实验研究和论文撰写的每个阶段,都汇集着导师大量的心血和关心。在校的两年多时间里,导师以渊博的科学知识、勤奋的工作精神、诲人不倦的优秀品格、宽以待人的胸怀,时刻为作者树立学习的榜样和前进的方向,使作者受益终生,不仅学到了丰富的科学知识,更领悟了很多做人的道理。在作者的论文完成之际,再次向导师表示衷心的感谢,致以诚挚的敬意!

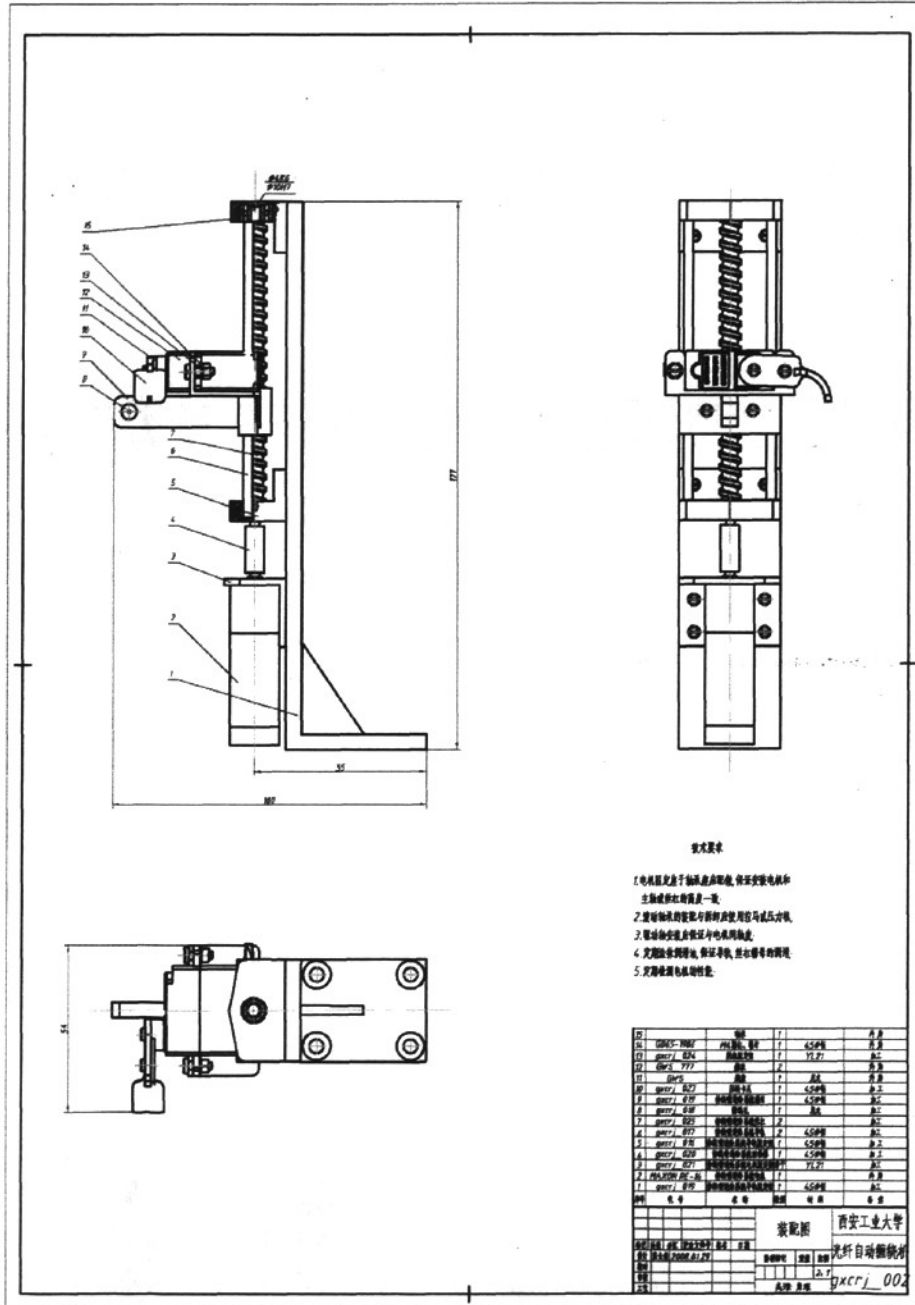
在完成课题研究过程中,得到了教研室马保吉教授的热情帮助,另外,朱育权教授给予作者细心指导和大量帮助,帮助作者解决了实验中的很多难题,在此对他表示深深的感激。正是他们的耐心指导和大力支持,使作者的课题能够顺利进行。在此向他们致以由衷的谢意。

同时感谢教研室的各位老师和每位同学给予作者的帮助与照顾,感谢张学文、董三峰,同时与尹若丹进行的交流给予作者很多帮助,感谢他们一直对作者的关心与支持,没有他们的鼓励与支持,论文是无法顺利完成。

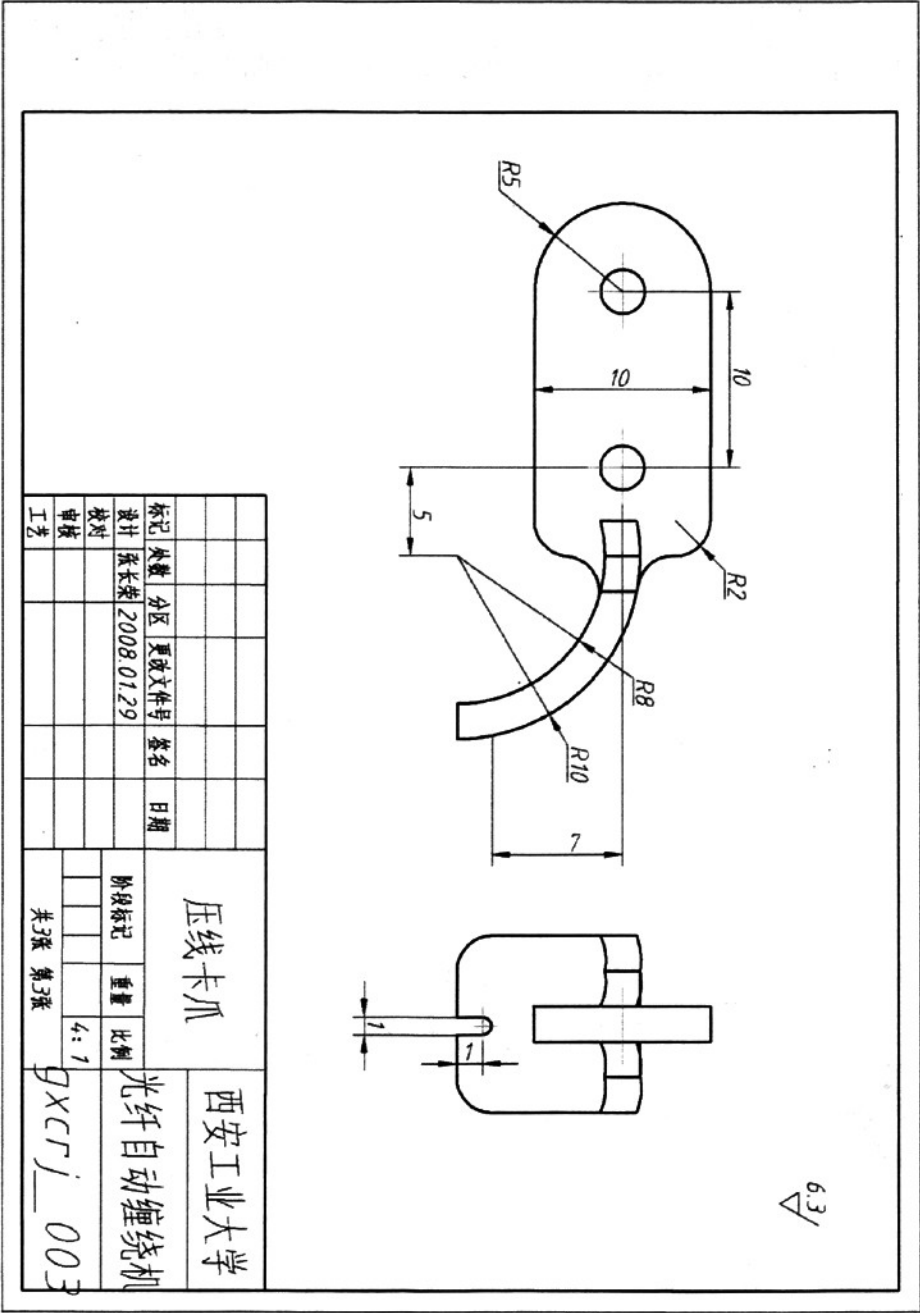
最后,要感谢父母和家人对作者精神上的鼓励和生活上的帮助,正是由于他们的全力支持,课题研究才得以最终完成。

|           |     |            |       |    |     |        |  |
|-----------|-----|------------|-------|----|-----|--------|--|
| 主 轴 进 给   |     |            |       |    |     | 西安工业大学 |  |
| 系统简化      |     |            |       |    |     |        |  |
| 标记        | 数量  | 材料         | 规格及代号 | 备注 | 日期  |        |  |
| 图二        | 图长数 | 2008.07.29 |       |    |     |        |  |
| 设计        |     |            |       |    |     |        |  |
| 审核        |     |            |       |    |     |        |  |
| 工艺        |     |            |       |    |     |        |  |
|           |     | 材料代号       |       | 重量 | 比例  |        |  |
|           |     |            |       |    | 1:2 |        |  |
| 共29张      |     | 第29张       |       |    |     |        |  |
| QXCFJ_029 |     |            |       |    |     |        |  |
| 光纤自动缠绕机   |     |            |       |    |     |        |  |

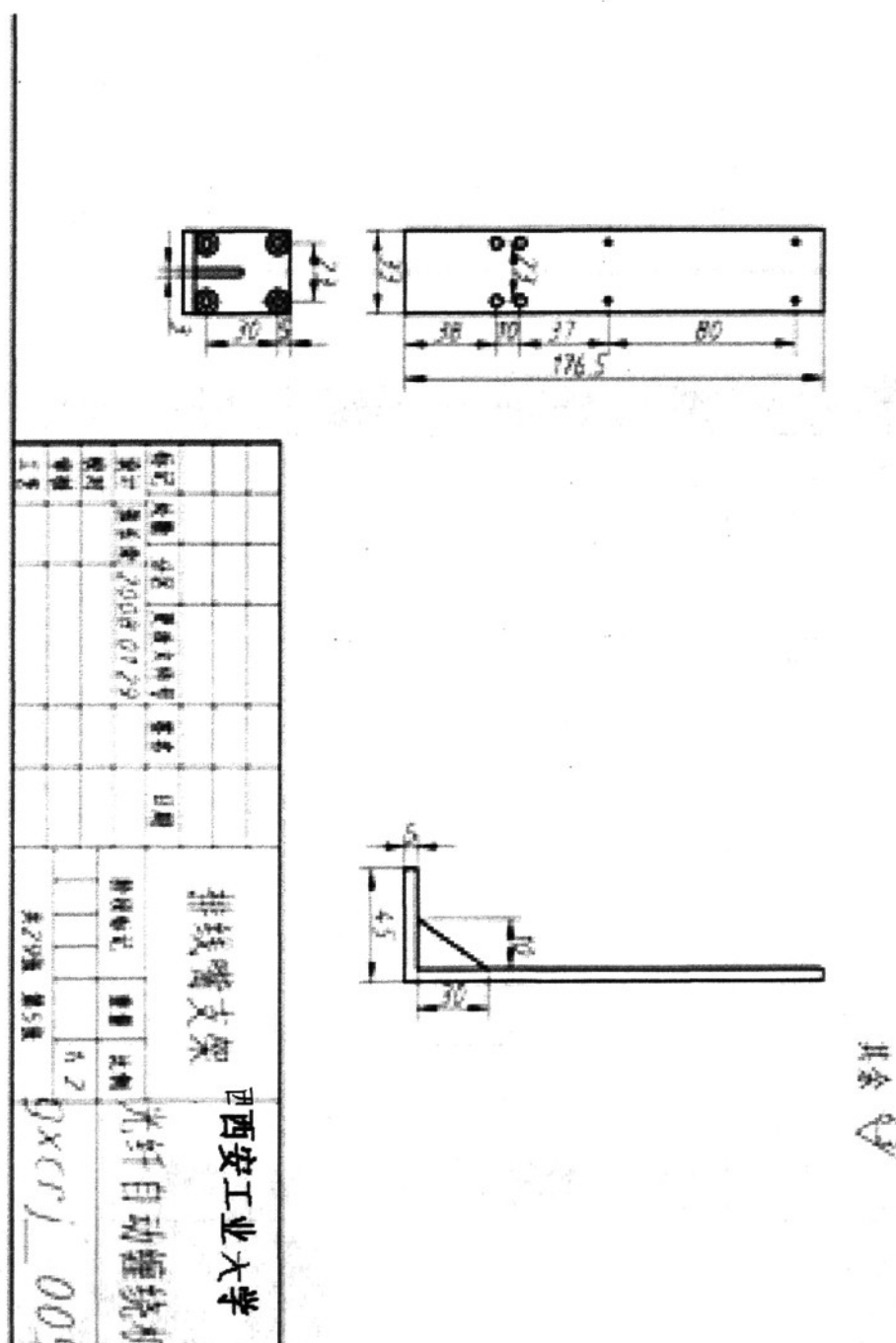
# B. 排线嘴进给机构装配图



C. 压线卡爪零件图

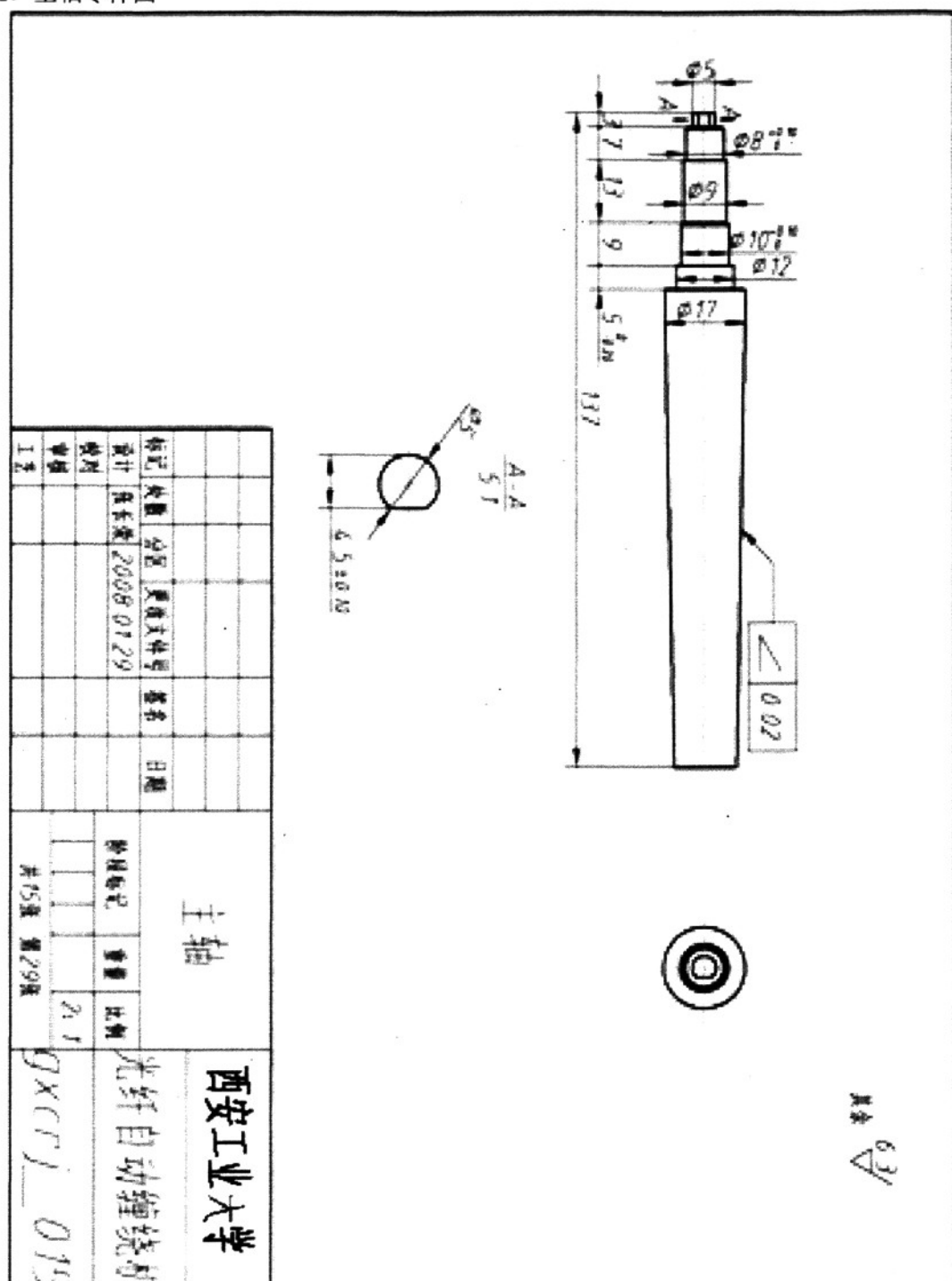


D. 排线嘴支架零件图

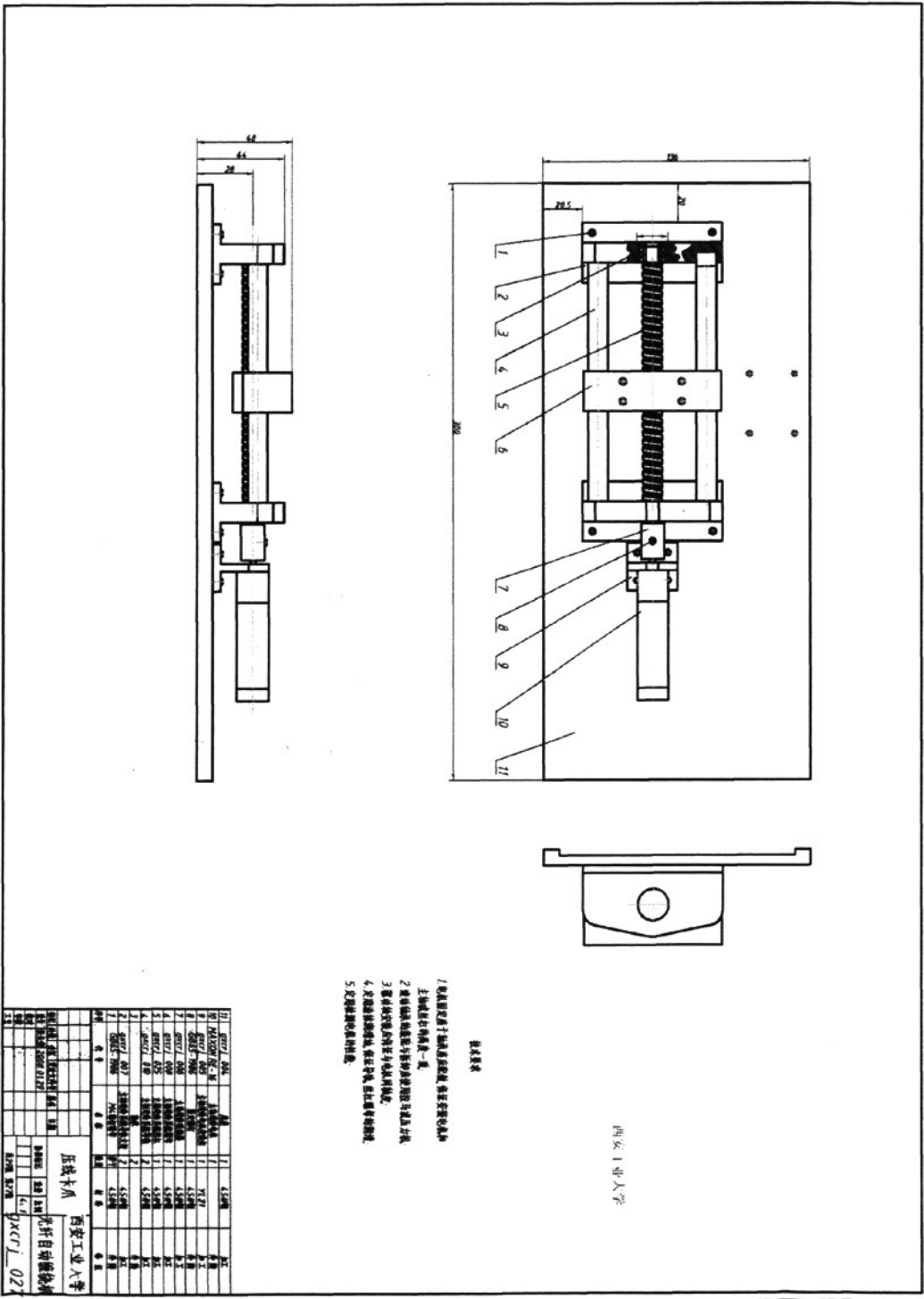




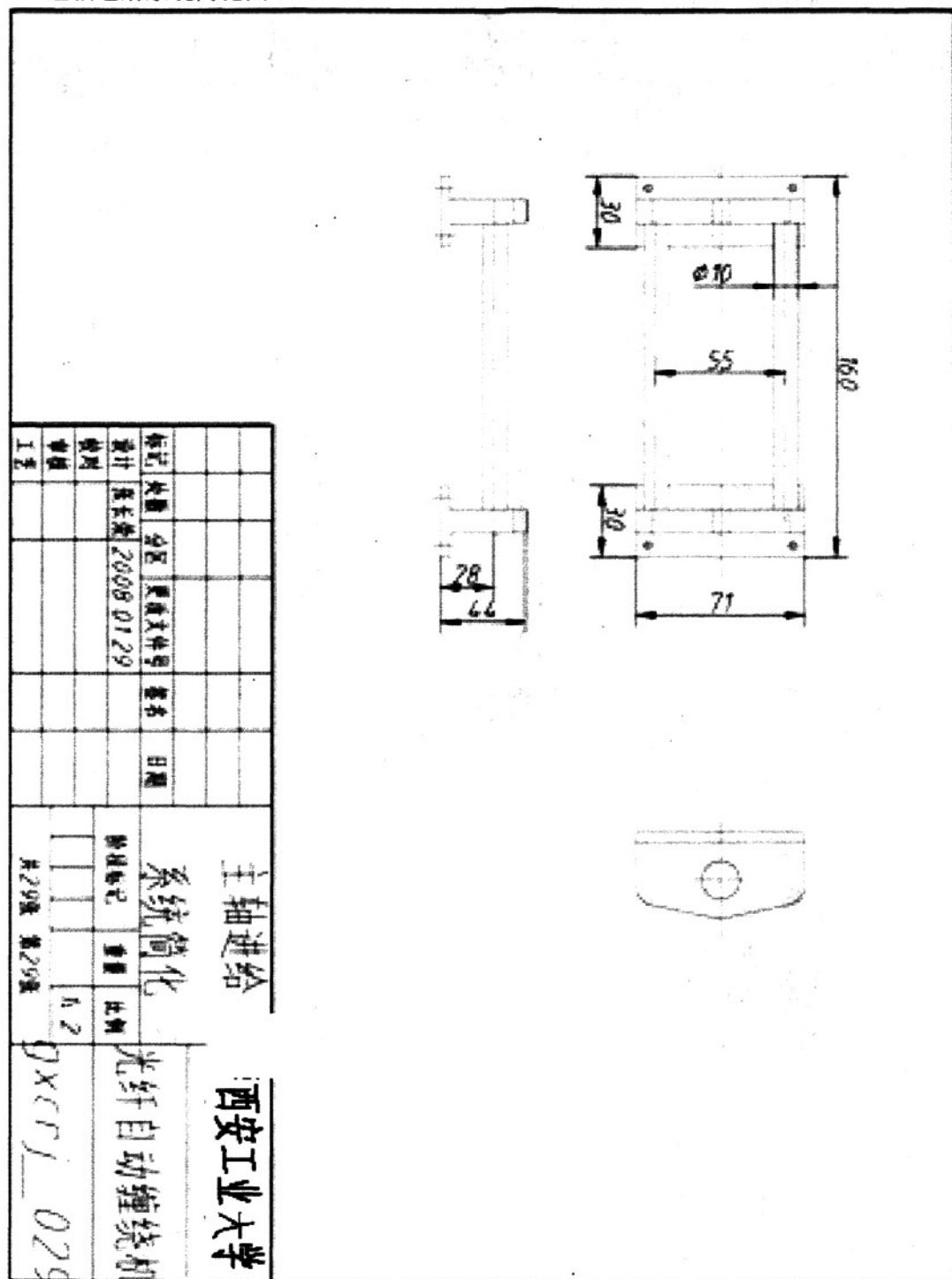
E. 主轴零件图



F. 主轴进给系统装配图



G. 主轴进给系统简化图



H. 排线嘴系统简化图

