

# Promoting the Bending Strength of the Beam of Gantry Machine Tool by the Principle of Prestress

Chao Luo<sup>1\*</sup>, Aiping Song<sup>1</sup>, Qingbo Zhang<sup>1</sup>, Shufeng Wang<sup>2</sup>, Haibing Zhang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Mechanical Engineering, Yangzhou University, Yangzhou Jiangsu

<sup>2</sup>Super Machine Tool Co. Ltd., Yangzhou Jiangsu

Email: \*ahchao14@sina.cn

Received: Jun. 8<sup>th</sup>, 2016; accepted: Jun. 26<sup>th</sup>, 2016; published: Jun. 30<sup>th</sup>, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## Abstract

Beam is one of the important parts of gantry machine tool; compared with other parts, it bears the force and bending moment that is larger and has more complex direction. If a beam of its bending strength is insufficient, it will produce obvious deformation down and bring about the processing precision of gantry machining center with a great influence. In this paper, based on the principle of prestressing, the bending strength of the beam is promoted, the force model of the prestressed beam is established, the relationship between the deflection of the beam and the prestress is analyzed, and the finite element method is used to verify the prestressed beam. The results show that it is feasible to apply the principle of prestress to improve the bending resistance of beams, and the deflection reduced about 80%, increasing the machining precision of the gantry machine tool effectively.

## Keywords

Prestress, Beam, FEM

# 利用预应力原理提升龙门机床横梁的抗弯强度

罗超<sup>1\*</sup>, 宋爱平<sup>1</sup>, 张钦搏<sup>1</sup>, 王树凤<sup>2</sup>, 张海滨<sup>2</sup>

<sup>1</sup>扬州大学机械工程学院, 江苏 扬州

<sup>2</sup>扬州力创机床有限公司, 江苏 扬州

Email: \*ahchao14@sina.cn

\*通讯作者。

文章引用: 罗超, 宋爱平, 张钦搏, 王树凤, 张海滨. 利用预应力原理提升龙门机床横梁的抗弯强度[J]. 机械工程与技术, 2016, 5(2): 130-139. <http://dx.doi.org/10.12677/met.2016.52017>

收稿日期：2016年6月8日；录用日期：2016年6月26日；发布日期：2016年6月30日

## 摘要

横梁是龙门机床的重要部件之一，与其他部件相比，它所承受的力及弯矩较大且方向较为复杂。如果横梁的自身抗弯强度不足，会产生明显的向下变形，将给龙门机床的加工精度产生一定的影响。本文利用预应力原理提升横梁的抗弯强度，建立预应力横梁的受力模型，分析横梁挠度与预应力的关系，并利用有限元方法对预应力横梁进行验证。结果表明应用预应力原理提升横梁抗弯性能是切实可行的，中部挠度减小了约80%，有效的增加了龙门机床的加工精度。

## 关键词

预应力，横梁，有限元

## 1. 引言

在大型数控龙门机床中，横梁是一个关键部件。由于龙门机床的滑座、主轴箱都会安装在横梁上，使得其在受自身重力的同时还会受到滑座、主轴箱的重力。长时间的使用后，龙门机床横梁会因为自身重力和滑座、主轴箱重力出现明显的向下弯曲变形，从而影响加工中心的使用性能和加工精度[1]。目前横梁采用调整内部结构(主要是加强筋)或者增大其自身体积等措施提升抗弯曲变形的能力。

预应力技术在桥梁建造领域有着广泛的应用并发挥了良好的作用[2] [3]。由此，将预应力技术移植于龙门机床的横梁中，以此来提升其抗弯强度。

## 2. 结构的设计

图 1 为预应力横梁的原理图，从图中可以看出，在没有使用预应力时，横梁本体受载荷会向下产生明显变形。当两端施以压应力后，横梁本体会产生微小的向上变形[4]，来抵抗向下的载荷，达到提升横梁抗弯强度的目的。

由图 1，提出了一种预应力横梁的结构图，如图 2；

在横梁内部制造数个通孔，通孔在横梁内有序排列，与横梁轴线平行。通孔内穿大于横梁长度的高强度双螺纹头拉杆，在横梁两端对称用垫片和螺母固定。调节螺母使高强度拉杆受拉应力，形成预应力拉杆，同时横梁的初始状态就相对地受压应力。调整螺母，使得上下高强度预应力拉杆所受拉力产生一定的差值，故横梁上下所受压应力不等，则横梁相应产生微小的向上弯曲变形。

这种结构有三个优势：

- 1) 横梁所受的压应力转移为高强度双螺纹头拉杆所受的拉应力；
- 2) 加载预应力后，可使横梁产生预变形，抵消横梁产生的变形，达到提升横梁弯曲强度的目的；
- 3) 调节螺母可以调整高强度预应力拉杆所受预拉力的大小。

## 3. 结构理论分析

- 1) 横梁本体在自身重力及滑座、主轴箱重力作用下的变形。将横梁本体看作简支梁模型，如图 3。外力 F 引起的挠度(以向上为正方向)

$$\omega_1 = -\frac{Fl^3}{48EI}$$

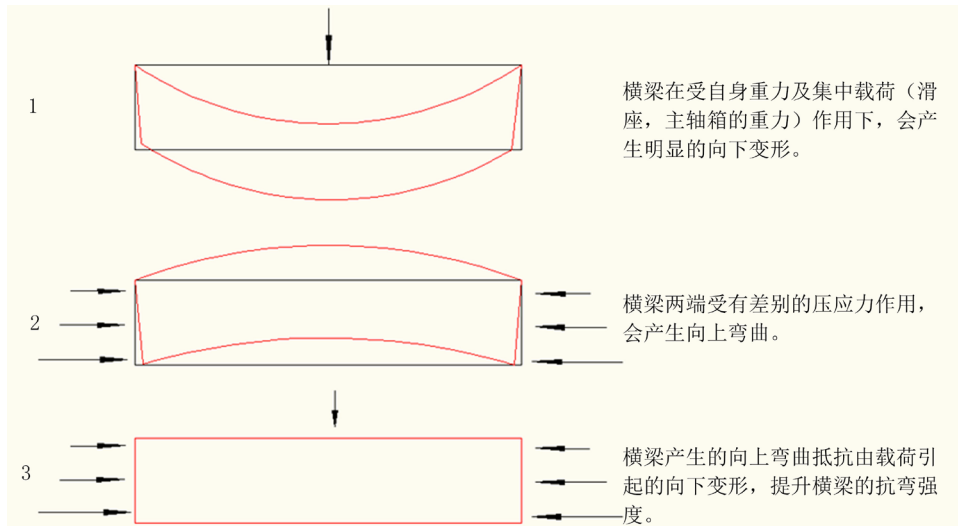


Figure 1. The principle diagram of prestressed beams

图 1. 预应力横梁的原理图

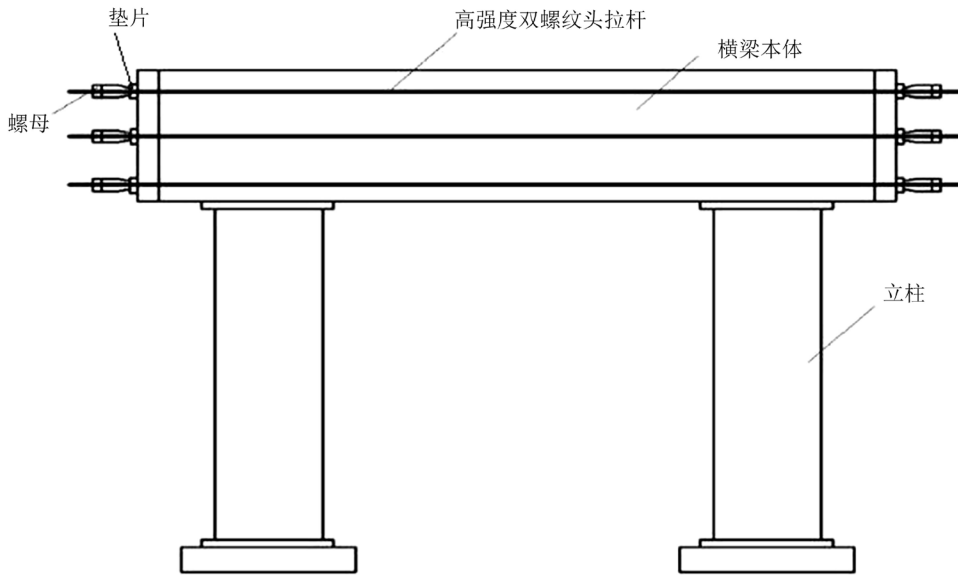


Figure 2. A kind of prestressed beam structure

图 2. 一种预应力横梁的结构图

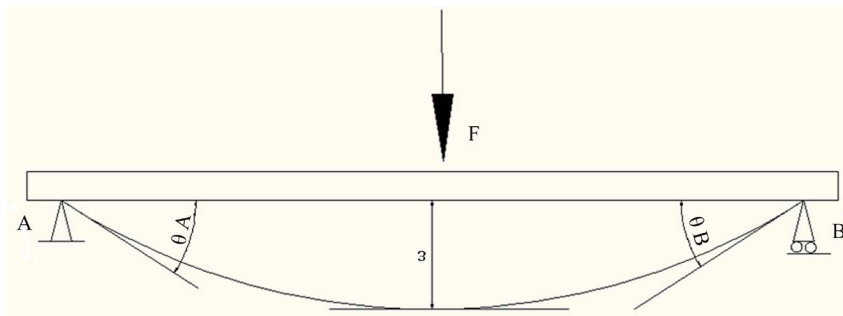


Figure 3. Beam gantry beam mechanical model

图 3. 龙门横梁的简支梁受力模型

其中  $l$  为横梁本体的长度； $EI$  为横梁本体的抗弯刚度； $F$  为横梁本体自身重力和集中载荷。

2) 横梁本体加载预应力后的变形。如图 4。

其中  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  产生的弯矩分别为(以 M3 方向为正方向)

$$M_1 = -P_1 \cdot a$$

$$M_2 = P_2 \cdot 0$$

$$M_3 = P_3 \cdot b$$

其中  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  为加载的压力,  $a$ ,  $b$  为  $P_1$ ,  $P_3$  到中心轴的距离, 二者相等。

预应力横梁简化为简支梁模型, 如图 5。

外力  $F$  引起的挠度:

$$\omega_1 = -\frac{Fl^3}{48EI}$$

由弯矩  $M$  引起的挠度:

$$\omega_2 = \frac{Ml^2}{16EI}$$

其中  $M = M_1 + M_2 + M_3$ ;  $l$  为横梁本体的长度;  $EI$  为横梁本体的抗弯刚度;

综上可知  $\omega_0 = \omega_1 + \omega_2$

要使横梁本体不发生弯曲变形, 则要求  $\omega_0 = 0$  即

已知  $a = b$ ; 推导后得:

$$P_3 - P_1 = \frac{l \cdot F}{3 \cdot a} \quad (*)$$

由(\*)式知

当  $P_3 - P_1 < \frac{l \cdot F}{3 \cdot a}$  时, 横梁本体会产生向下的弯曲变形;

当  $P_3 - P_1 = \frac{l \cdot F}{3 \cdot a}$  时, 横梁本体不会产生向下的弯曲变形;

当  $P_3 - P_1 > \frac{l \cdot F}{3 \cdot a}$  时, 横梁本体会产生向上的弯曲变形。

由上所知, 要提升横梁本体的抗弯强度, 减小其挠度, 增大龙门机床的精度, 必须使横梁不发生弯曲,  $P_3 - P_1 = \frac{l \cdot F}{3 \cdot a}$  这一公式满足了上述的要求。

## 4. 对预应力横梁进行有限元分析验证

### 4.1. 建立横梁三维模型

现以某公司 MC-G2040 龙门机床横梁作为例子。该龙门机床横梁长 4200 mm, 宽 1100 mm, 高 972.5 mm, 采用 HT300 铸铁, 质量约为 7000 kg。横梁上还要承受滑座和主轴箱, 两者质量约为 4000 kg,  $\phi 60$  mm 高强度双螺纹头拉杆。对横梁的结构按上所述, 稍作改进, 图 6 为利用 Solidworks 进行的三维造型。

### 4.2. 建立有限元模型

采用 ANSYS Workbench 软件对预应力横梁进行抗弯强度的分析。其材料属性如表 1。

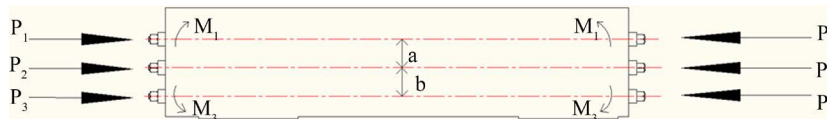


Figure 4. The stress of beam body after loading prestress

图 4. 横梁本体加载预应力后的受力图

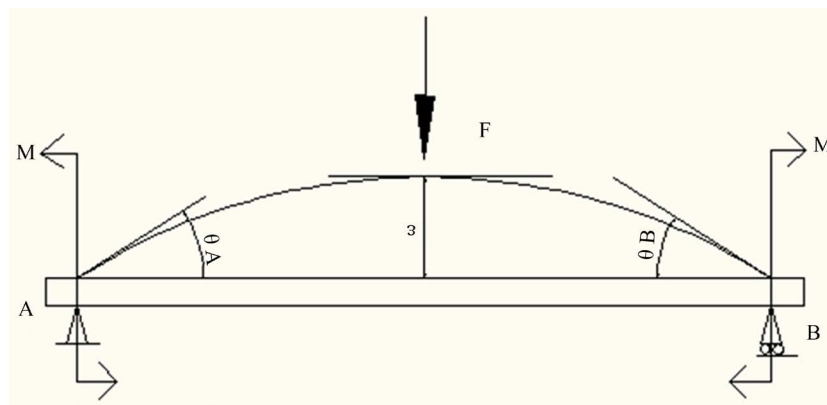


Figure 5. Beam mechanical model of prestressed concrete beams

图 5. 预应力横梁的简支梁受力模型

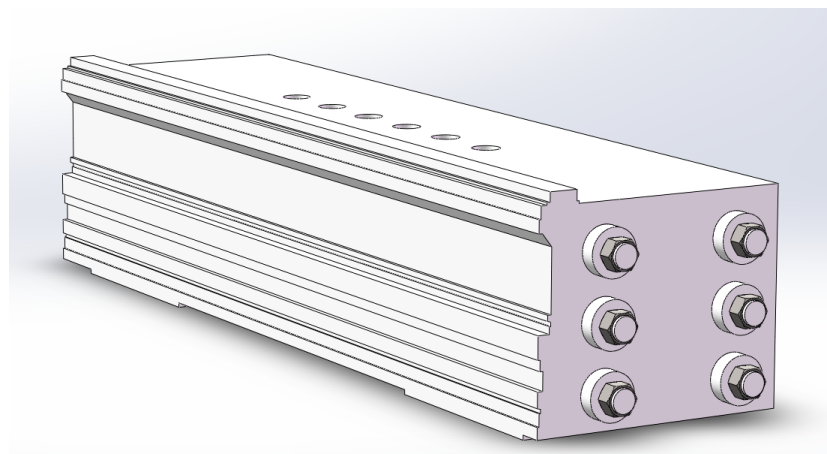


Figure 6. Three dimensional modeling of the beam with high strength double threaded rod

图 6. 装配高强度双螺纹头拉杆的横梁三维建模图

Table 1. Beam material properties

表 1. 横梁用材料部分属性

材料	质量密度(kg/m <sup>3</sup> )	弹性模量(N/m <sup>2</sup> )	泊松比
HT300	7.3E3	1.43E11	0.27

在有限元分析中，采用等效荷载法来分析预应力横梁。将高强度双螺纹头拉杆与横梁本体的作用分别进行考虑。首先将预应力作为结构的外部荷载，将预应力用等效荷载代替，通过计算等效荷载的适当取值，使在等效荷载作用于结构的变形与预加力作用下的变形相同。将高强度双螺纹头拉杆变为预应力拉杆时对结构产生的内力和变形用等效荷载对结构产生的内力和变形代替，即用等效荷载代替预应力拉杆的作用进行计算[5]。

将三维模型中的高强度双螺纹头拉杆及螺母简化为  $\phi 60$  mm，高 15 mm 的圆台，导入 ANSYS Workbench。划分网格时，横梁受力处要加密网格的划分。模型共 29,206 个节点，16,806 个单元。对横梁本体采用给定位移约束，一侧约束  $x$ ， $y$ ， $z$  三个方向，一侧约束  $x$ ， $z$  方向，模拟梁的简支状态[6]。

### 4.3. 预应力横梁的有限元验证

由前所述，对模型施加载荷，如表 2。

未加载预应力时横梁经有限元分析，总体变形如图 7 所示，变形量约为 0.015 mm；横梁中部的挠度如图 8 所示，约为 0.01 mm。

加载预应力后横梁经有限元分析，总体变形如图 9 所示，变形量约为 0.005 mm，中部挠度如图 10 所示，约为 0.004 mm。

在添加预应力后，总体变形量及横梁中部挠度明显下降。但是按照理论所述，加载预应力后横梁中部挠度应该约为 0 mm，但经验证未达到理想效果，挠度仍有 0.004 mm。其原因经分析：

- 1) 从模型上来说，采用了简支梁模型；
  - 2) 在加载载荷时，选择了集中载荷；
- 这两种都与实际工况有一定差距，故出现误差。

### 4.4. 改进后的预应力横梁有限元验证

在上述基础上，稍许加大  $P_3$  压力值，由第二章理论分析可知，增大  $P_3$ ，弯矩  $M$  增大，挠度也随之增大。载荷如表 3。

经分析，总体变形如图 11 所示，变形量为 0.003 mm；中部挠度如图 12 所示，约为 0.002 mm。挠度较之前减小了 0.002 mm，横梁趋于平直，变形量也基本于理论结果相吻合。

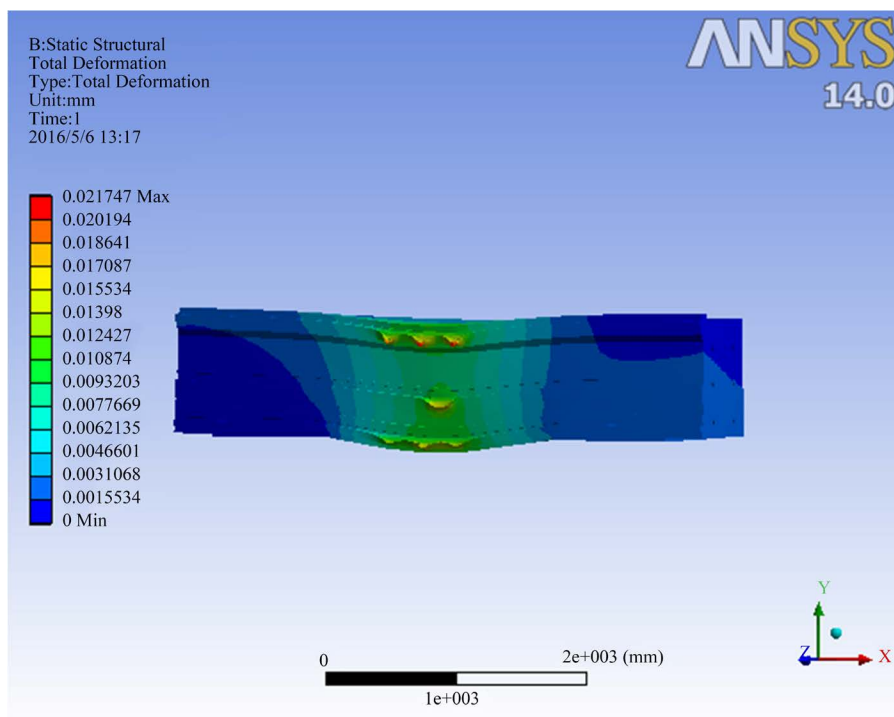


Figure 7. Total deformation cloud of prestressed beam without loading

图 7. 未加载预应力的横梁总体变形云图

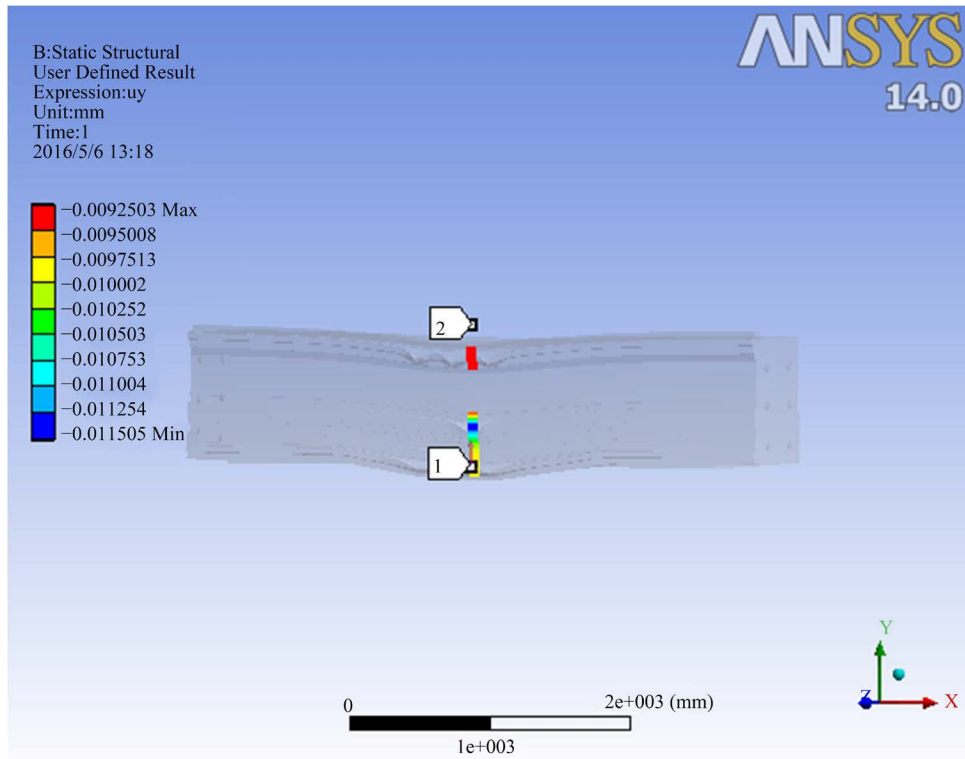


Figure 8. Deflection diagram of prestressed beams without loading  
图 8. 未加载预应力的横梁变形挠度图

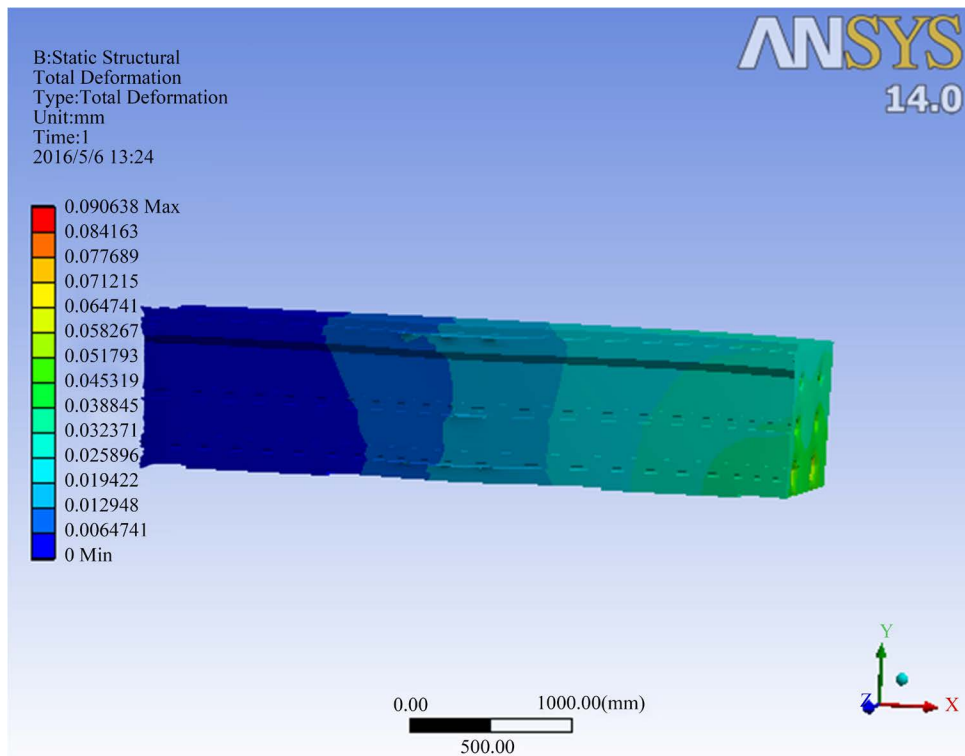


Figure 9. Total deformation of prestressed beam  
图 9. 加载预应力的横梁总体变形云图



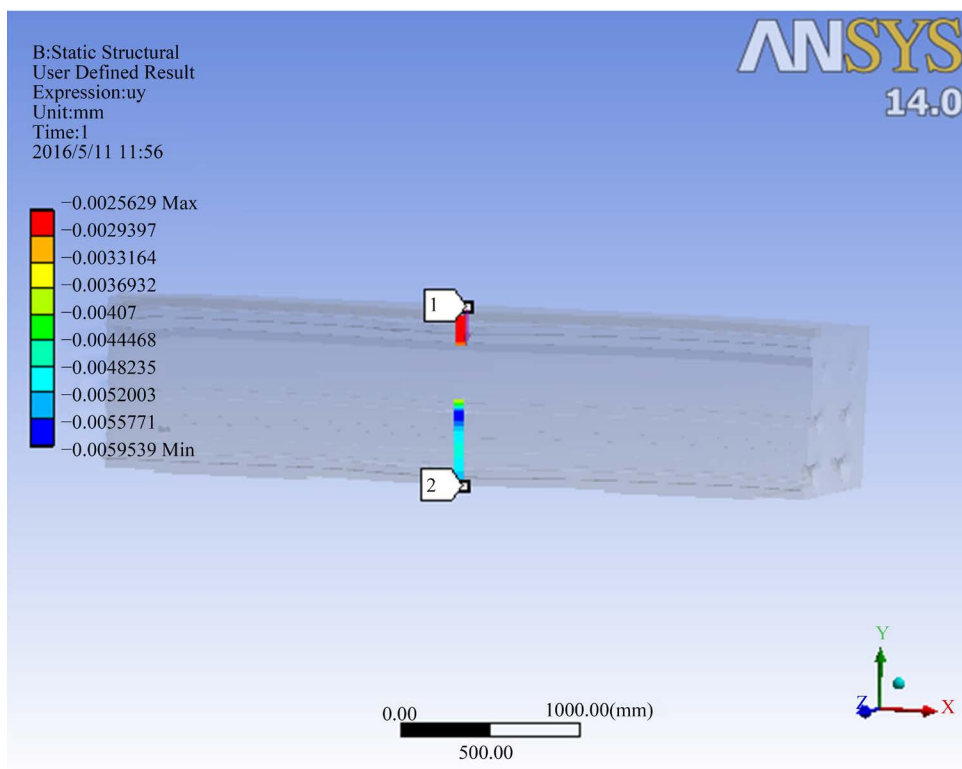


Figure 10. Deflection diagram of prestressed beam  
图 10. 加载预应力的横梁挠度图

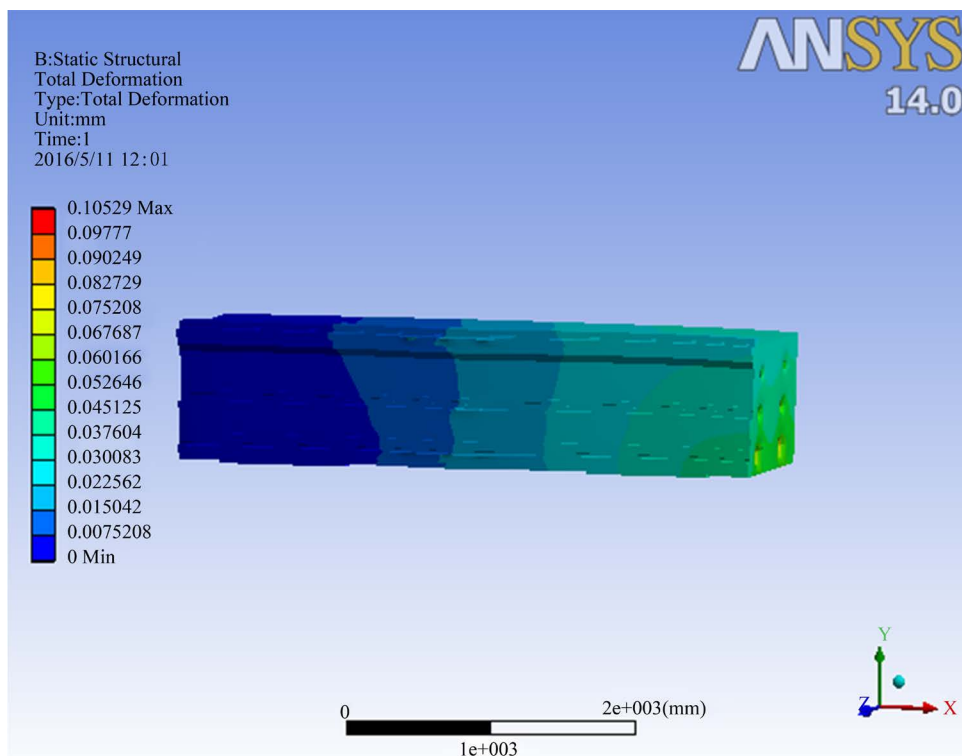


Figure 11. Overall deformation of the beam after loading and improving the prestress  
图 11. 改进加载预应力后的横梁总体变形云图



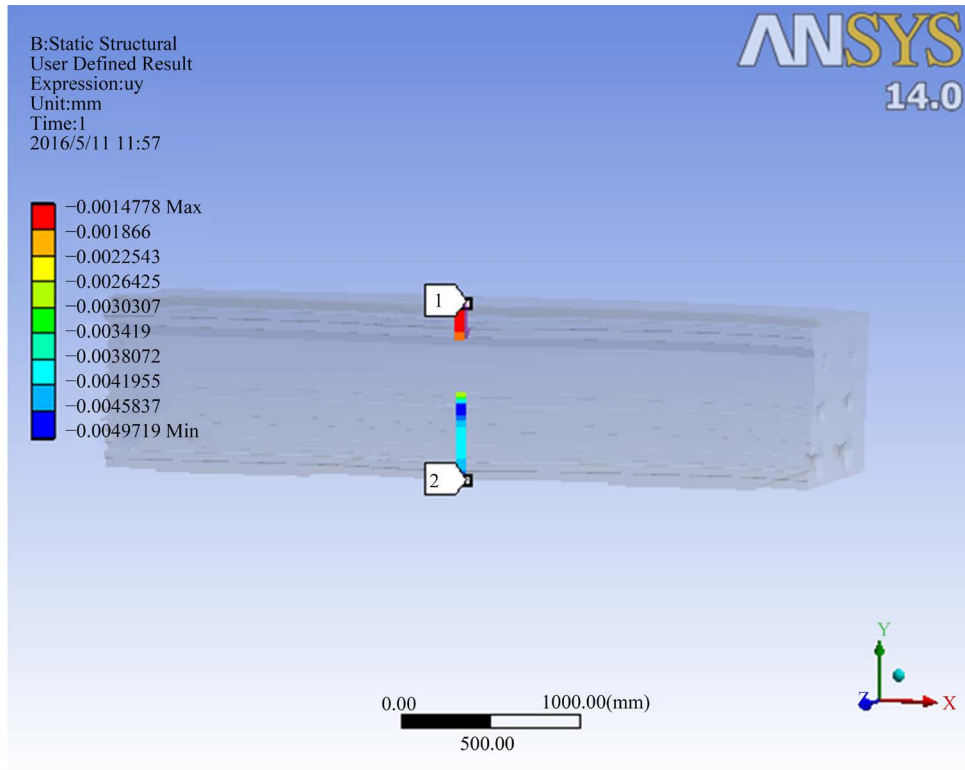


Figure 12. Deflection diagram of prestressed beam after loading improved  
图 12. 改进加载预应力后的横梁挠度图

Table 2. Load type table  
表 2. 载荷种类表

载荷类型	大小	方向	备注
横梁本体重力	70,000 N	-Y	
主轴箱、滑座等效力	40,000 N	-Y	
P <sub>1</sub>	100.8E3 N	X、-X	两端对称
P <sub>2</sub>	249.2E3 N	X、-X	两端对称
P <sub>3</sub>	650.8E3 N	X、-X	两端对称

Table 3. Improved load type table  
表 3. 改进后的载荷种类表

载荷类型	大小	方向	备注
横梁本体重力	70,000 N	-Y	
主轴箱、滑座等效力	40,000 N	-Y	
P <sub>1</sub>	100.8E3 N	X、-X	两端对称
P <sub>2</sub>	249.2E3 N	X、-X	两端对称
P <sub>3</sub>	683.8E3 N	X、-X	两端对称

## 5. 总结

通过有限元方法分析三组工况下，横梁本体的变形。在第一组中，无预应力加载横梁本体，变形量

及挠度都较大, 横梁向下弯曲。第二组在第一组的基础上, 加载预应力, 理论推导的结果于实际结果有误差, 分析原因后, 进行了第三组的改进, 加大了 P3, 其结果基本于理论推导相同。由此可知:

- 1) 应用预应力原理提升横梁抗弯性能是切实可行的, 也是容易实现的;
- 2) 本文提出的预应力横梁结构是合理的;
- 3) 理论推导的结果是正确的, 但要考虑理论模型与实际工况的误差;

总之, 将预应力方法与横梁本体结合的结构, 克服了目前调整内部结构(主要是加强筋)或者增大其自身体积等措施提升抗弯曲变形的局限和不足。在现有的技术和条件下切实可行。这对于降低成本, 结构强度等方面具有非常重要的意义。

## 基金项目

江苏省重点研发计划(产业前瞻与共性关键技术)(BE2015115)。

## 参考文献 (References)

- [1] 陈斯炮, 李锻能, 等. 大跨距龙门五面体机床横梁最大工作载荷分析[J]. 机电工程技术, 2009(9): 89-91.
- [2] Schnellenbach-Held, M. and Steiner, D. (2013) Adaptive Prestressed Structures. *Bauingenieur*, **88**, 463-464.
- [3] Schnellenbach-Held, M. and Steiner, D. (2014) Adaptive Fuzzy Controlled Prestressed Concrete Structure. *Bauingenieur*, **89**, 57-59.
- [4] 戚家南, 王景全, 吕志涛. 体外预应力混凝土梁受剪承载力计算方法研究[J]. 建筑结构学报, 2015(3601): 92-97.
- [5] 张波, 赵顺波, 等. 预应力混凝土梁受力全过程有限元分析[J]. 华北水利水电学院学报, 2007(2): 47-49.
- [6] 刘宇泽. 利用 ANSYS 对预梁受力分析[J]. 应力简支安徽建筑, 2012(2): 166-167.

### 再次投稿您将享受以下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>