

薄膜预应力对连栋塑料温室结构极限承载力的影响^{*}

王新忠 马兴超 毛罕平

(江苏大学现代农业装备与技术省部共建教育部重点实验室, 镇江 212013)

【摘要】 以连栋塑料温室整体结构为研究对象,采用实物模型试验和有限元分析相结合的方法,探讨薄膜预应力对连栋塑料温室结构极限承载力的影响。在 ANSYS 10.0 软件中,采用温度载荷模拟预应力,通过对薄膜施加不同的温度载荷建立 6 种薄膜预应力下的连栋塑料温室结构模型,并对该模型进行雪载荷工况下的双重非线性屈曲计算。通过分析不同薄膜预应力下的载荷-位移曲线,研究了薄膜预应力对连栋塑料温室结构极限承载力的影响。结果表明,薄膜预应力不会影响连栋塑料温室结构的屈曲模态,但会使结构极限承载力减小 17% ~ 63%。

关键词: 连栋塑料温室 极限承载力 薄膜预应力 有限元分析

中图分类号: S625.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)10-0176-05

Influence of Film-preload on Ultimate Bearing Capacity of Multi-span Plastic Greenhouse

Wang Xinzhong Ma Xingchao Mao Hanping

(Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology, Ministry of Education & Jiangsu Province, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract

The integral structure of the multi-span plastic greenhouse was taken as the research subject, and influence of film-preload on ultimate bearing capacity of the multi-span plastic greenhouse was studied through physical model test and finite element analysis. By using ANSYS 10.0, firstly, temperature load was performed to numerically simulate preload, the computational models of greenhouse structure on six kinds of film-preloads condition were established by imposing temperature load. Then, dual nonlinear analysis to the computational model of greenhouse structure was given on snow load condition. Therefore, ultimate bearing capacity was confirmed by racing the balance path of the loading-displacement curve. According to analyze loading-displacement curve, influence of the film-preload on ultimate bearing capacity could be researched. It could be concluded that film-preload would not affect the integral structural buckling mode of multi-span plastic greenhouse, but would reduce ultimate bearing capacity of greenhouse structure by 17% ~ 63%.

Key words Multi-span plastic greenhouse, Ultimate bearing capacity, Film-preload, Finite element analysis

引言

结构极限承载力是指结构完全崩溃前所能承受的最大载荷,是结构设计中的重要部分。研究结构极限承载力的目的在于分析结构极限承载力的影响

因素,得到准确的结构极限承载力,避免发生工程事故。目前,有关连栋塑料温室结构极限承载力的研究成果已有很多^[1-3],但尚未涉及考虑薄膜预应力的连栋塑料温室整体结构的极限承载力问题。

在连栋塑料温室中,薄膜本身没有抗弯、抗压能

收稿日期: 2011-01-13 修回日期: 2011-03-01

* 高等学校博士点专项科研基金资助项目(200802990009)、江苏省科技支撑计划资助项目(BE2008323)、江苏省农机三项工程资助项目(NJ2011-46)、昆山市农业科技计划资助项目(KN1037)和昆山市国际科技合作资助项目(KZ1011)

作者简介: 王新忠,副教授,主要从事设施农业装备及技术研究, E-mail: wangxinzhong@gmail.com

力,只有对薄膜施加预应力,薄膜才能起到围护和传递载荷的作用^[4]。连栋塑料温室的构件常采用薄壁小截面的型材,在薄膜预应力作用下,容易出现柔性变形。如采用不考虑薄膜预应力的连栋塑料温室结构模型,将导致结构极限承载力的计算结果与实际情况有较大的差异,造成材料浪费或事故隐患。

连栋塑料温室的结构体系是由立柱、天沟、纵梁、拱架等构件组成的统一整体,平面结构或局部空间结构分析没有考虑各构件之间的相互约束和支援作用^[5],不能准确确定结构极限承载力。

综合以上问题,采用实物模型试验和有限元分析相结合的方法,研究考虑薄膜预应力的连栋塑料温室整体结构的极限承载力问题,并探讨薄膜预应力对结构极限承载力的影响作用。

1 连栋塑料温室的静力模型试验

1.1 实物模型制作

选取双圆弧尖顶结构的连栋塑料温室为研究对象,其主要构件采用热镀锌处理的碳素结构钢型材(Q235A),以薄膜作为覆盖材料,具体参数如下:跨度 8 m,开间 4 m,脊高 5.25 m,肩高 3 m,圆弧半径 5 m。

综合考虑模拟精度和试验成本,确定实物模型的几何相似比为 1:10,模型长度 1.2 m,宽度 2.4 m。由于温室构件的截面尺寸相对于温室结构的几何尺寸较小,按几何相似比缩小后更薄,不易连接,且受到标准型材现有型号的限制,本文将依据受压构件截面面积相似和受弯构件截面主惯性矩相似的原则^[6-7],调整温室构件的截面形式。

实物模型采用与原型构件相一致的材料,由 $\phi 16 \times 1.6$ mm、 $\phi 10 \times 1.6$ mm、 $\phi 8 \times 1.2$ mm 和 $\phi 8$ mm 4 种型材焊接而成,如图 1 所示。

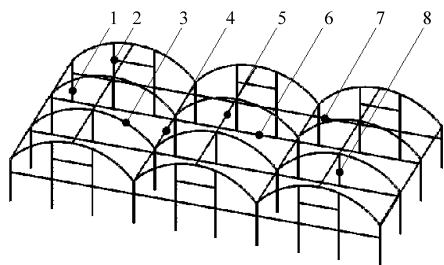


图 1 温室结构的实物模型

Fig. 1 Physical model of greenhouse structure

- 1. 立柱 2. 山墙 3. 拱架 4. 天沟 5. 纵梁 6. 拉杆 7. 端梁
- 8. 吊杆

1.2 应变监测点布置

在模型试验中,应变监测点重点布置在变形大、易破坏的部位^[6]。采用 ANSYS 10.0 软件对图 1 的

实物模型进行静力分析,确定应变较大的位置。在实物模型的对应位置分别布置应变监测点(1~8号),如图 2 所示。

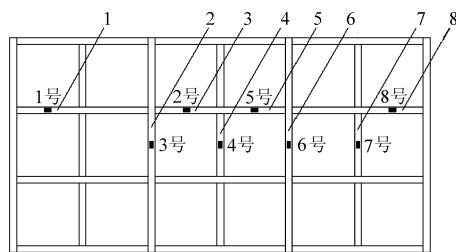


图 2 应变监测点的布置示意图

Fig. 2 Distribution of strain gauges

- 1、3、5、8. 拱架 2、6. 天沟 4、7. 纵梁

1.3 雪载荷等效转换

基于 ANSYS 支座法^[8],将雪载荷转换为拱架、天沟等构件上的等效集中载荷进行加载,加载位置如图 3 所示。

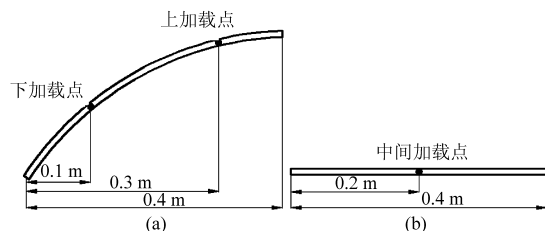


图 3 加载位置示意图

Fig. 3 Diagram of load location

- (a) 拱架(1/2 立面图) (b) 天沟/纵梁

在 ANSYS 10.0 软件中,约束加载位置的节点,并进行 3 种雪载荷工况下的有限元求解,结果如表 1 所示。

表 1 雪载荷的等效转换结果

Tab. 1 Equivalent results of snow load kg

加载位置	雪载荷/ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$		
	0.20	0.25	0.30
拱架(上部)	4.82	5.14	5.52
拱架(下部)	8.76	9.38	10.04
山墙(上部)	2.41	2.57	2.76
山墙(下部)	4.38	4.69	5.02
天沟(中部)	2.86	3.57	4.29
纵梁(中部)	0.31	0.38	0.46

1.4 应变数据采集与处理

应变测量系统是由 NI 9237 采集卡、NI WLS-9163 外盒、RJ-50 电缆、NI 9949 附件和应变片等组成,采用双臂半桥电路进行测量。NI 9237 采集卡操作简单、精度高,自身带有防混叠滤波器,增益误差 0.05%,偏移误差 0.05%,增益漂移 $100 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$ 。

通过吊挂砂袋的方法,分别模拟 3 种雪载荷工

况下的加载试验,并通过 LabVIEW 采集程序实现应变数据的实时记录和保存。

考虑到外界噪声的干扰,采用傅里叶函数对应变-时间曲线进行拟合,以确定有效的应变。限于篇幅,仅绘出 0.30 kN/m^2 雪载荷工况下 4 个监测点的应变-时间曲线,如图 4 所示。

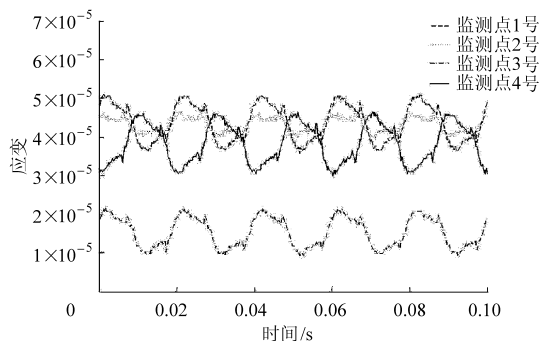


图 4 0.30 kN/m^2 雪载荷工况下监测点的应变-时间曲线

Fig. 4 Strain-time curves of snow load of 0.30 kN/m^2

2 基于屈曲分析技术的极限承载力计算

2.1 计算理论

非线性屈曲分析技术是一种精确计算结构极限承载力的方法^[9-10],该方法把载荷分成了一系列的载荷增量,按增量列式法展开后的平衡方程为

$$(\mathbf{K}_0 + \mathbf{K}_L + \mathbf{K}_\sigma) \Delta u = \mathbf{F} - \mathbf{F}_n \quad (1)$$

式中 \mathbf{K}_0 ——弹性刚度矩阵

\mathbf{K}_L ——初始位移矩阵

\mathbf{K}_σ ——初始应力刚度矩阵

Δu ——位移增量 \mathbf{F} ——外部载荷向量

\mathbf{F}_n ——内部载荷向量

对每一个载荷增量分别进行平衡迭代,直至求得使 $\mathbf{F} - \mathbf{F}_n$ 在允许范围内的临界载荷。

在大跨度骨架-膜结构极限承载力的计算过程中,当载荷达到一定的程度,结构将完全崩溃或者突然跳至另一稳定形状的平衡状态,切线刚度矩阵 $\mathbf{K}_0 + \mathbf{K}_L + \mathbf{K}_\sigma$ 可能变为降秩矩阵,从而导致严重的收敛问题^[8,11]。本文采用的弧长法通过在式(1)的平衡方程中引入一个附加载荷因子 λ ($-1 < \lambda < 1$),使得平衡迭代沿一段弧收敛,避免了切线刚度矩阵的斜率为零或负值的情况,有助于收敛。为了保证计算结果的收敛,采用力收敛准则

$$\| \mathbf{F}^{(i+1)} - \mathbf{F}_2^{(i)} \| / \| \mathbf{F}^{(i)} \|_2 \leq \varepsilon_\alpha$$

经多次调试运算,表明 ε_α 取值在 3% 附近时,可以同时保证计算精度和计算过程的收敛性。

在双重非线性屈曲计算中,通过跟踪整个载荷-位移的平衡路径,来确定结构极限承载力。由于连栋塑料温室各构件之间的相互作用,载荷-位移曲线

中将出现多处转折点。依据文献[1],取曲线斜率开始变化处的载荷作为连栋塑料温室结构极限承载力。

2.2 膜材力学特性测试

为了确定膜材的本构关系,进行了膜材试样的纵向拉伸试验。

试样取自市场选购的温室常用 PE(聚乙烯)膜,厚度 0.15 mm ,采用 WDW30005 型 500 N 电子万能试验机进行试验,试验力和试验速度的精确度为 0.5% 。参照 GB/T 1040.3—2006,取 5 个纵向试样,试样拉伸标距 50 mm ,宽度 15 mm ,实测厚度 0.148 mm ,以 20 mm/min 的速度进行拉伸直至断裂,记录每个试样的试验数据,计算其平均值作为试验结果。由试验数据换算得到的膜材屈服强度 σ_s 为 8.87 MPa ,断裂强度 σ_b 为 17.08 MPa ,弹性模量 E 为 177.11 MPa 。

2.3 计算模型建立

选取连栋塑料温室的实物模型为分析对象,在 ANSYS 10.0 软件中,采用 Beam188 单元和 Shell41 单元建模,定义材料参数,划分单元网格,建立连栋塑料温室结构的计算模型,如图 5 所示。积雪分布系数参照文献[12],以线载荷的形式施加。

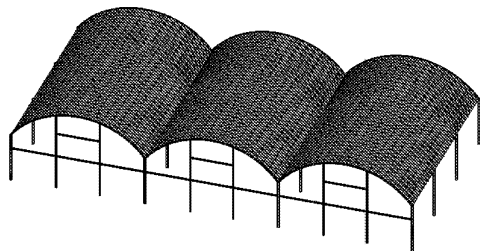


图 5 温室结构的计算模型

Fig. 5 Computational model of greenhouse structure

文献[13]曾提到薄膜预应力通常取膜材拉伸强度的 $1.5\% \sim 4.0\%$,预应力太大,会严重降低结构极限承载力;预应力太小,则不能满足对薄膜刚度的需求。在 ANSYS 10.0 软件中,通过对薄膜施加温度载荷的方法模拟薄膜预应力,建立 0.125 、 0.250 、 0.375 、 0.500 、 0.625 和 0.750 MPa 6 种薄膜预应力下的连栋塑料温室结构模型,如图 6 所示,90% 以上薄膜单元的最大应力与最小应力相差在 3% 以内,可以认为薄膜上的预应力分布均匀^[8]。

2.4 屈曲计算与结果分析

2.4.1 计算结果和试验结果对比分析

采用 2.1 节所述的计算方法,对图 5 的计算模型进行有限元静力分析。节选相同雪载荷工况下的有限元计算结果和实物模型试验结果进行对比,如表 2 所示。

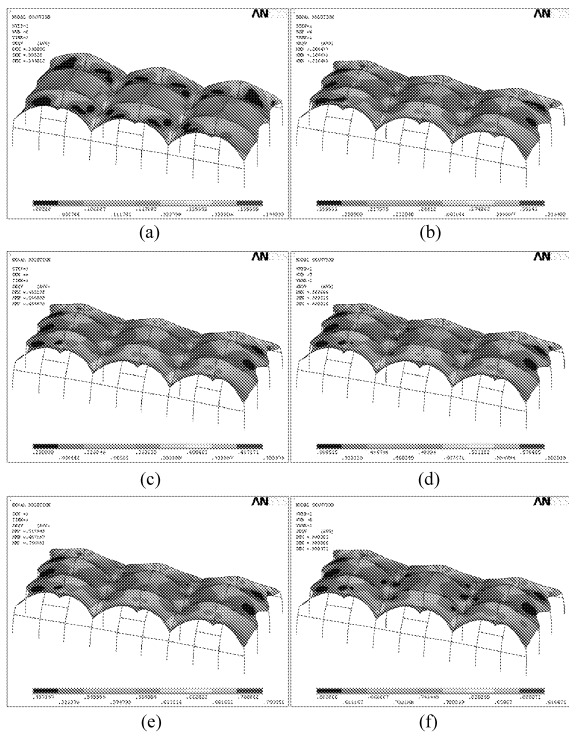


图 6 6 种薄膜预应力下的温室结构模型

Fig. 6 Computational model of six kinds of film-preloads

- (a) 0.125 MPa (b) 0.250 MPa (c) 0.375 MPa
- (d) 0.500 MPa (e) 0.625 MPa (f) 0.750 MPa

表 2 相同雪载荷工况下的应变对比

Tab.2 Strain comparison of same snow load

监测点	计算结果	试验结果	误差/%
1 号	5.118×10^{-5}	4.374×10^{-5}	14.5
2 号	5.231×10^{-5}	4.315×10^{-5}	17.5
3 号	1.703×10^{-5}	1.540×10^{-5}	9.6
4 号	4.212×10^{-5}	3.820×10^{-5}	9.3

有限元计算和实物模型试验所得应变的分布规律基本相同,均呈现出计算结果略大于试验结果的现象。在天沟和纵梁处(监测点 3 号、4 号),应变误差在 10% 以内;在拱架上(监测点 1 号、2 号),应变误差偏大,在 17.5% 以内,其主要原因在于不均布雪载荷工况下复杂的受力情形使得拱架处于多向应力状态,从而导致计算结果和试验结果的误差增大。此外,两种模型(计算模型、实物模型)载荷条件和边界条件的细微差别,也造成了计算结果和试验结果的差异。

以上数据表明,文中采用的建模方式和计算方法可行,可为连栋塑料温室结构极限承载力的计算提供可靠性保证。

2.4.2 不同结构形式下结构极限承载力分析

在 1.50 kN/m^2 雪载荷工况下,分别对不考虑薄膜预应力的连栋塑料温室平面结构模型和图 5 的整

体结构模型进行双重非线性屈曲计算,并跟踪整个载荷-位移的平衡路径,如图 7 所示。

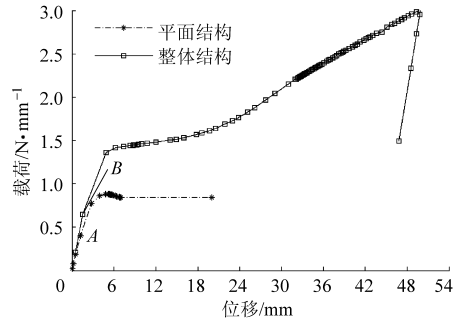


图 7 不同结构形式下的载荷-位移曲线

Fig. 7 Loading-displacement curve on different structural types conditions

由图 7 可知,在不考虑薄膜预应力的情形下,采用连栋塑料温室平面结构计算得到的结构极限承载力(A 点对应的载荷)为 0.42 N/mm^2 ,而整体结构极限承载力(B 点对应的载荷)为 0.65 N/mm^2 ,两者相差 35.4%,这是由于连栋塑料温室各构件的刚度接近,而平面结构没有考虑面外构件的约束和支援作用,从而降低了结构的整体刚度,造成了两者之间的差异^[14]。

由此可见,采用连栋塑料温室平面结构求得的结构极限承载力是保守的,易造成材料的浪费,整体结构分析才可以反映出真实的屈曲性能。

2.4.3 薄膜预应力对结构极限承载力的影响

对图 6 的温室结构模型进行 1.50 kN/m^2 雪载荷工况下的双重非线性屈曲计算,汇总 6 种薄膜预应力下的载荷-位移曲线,如图 8 所示。

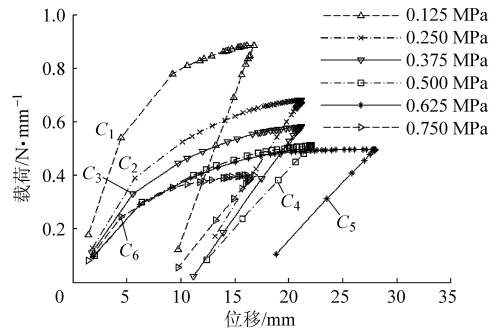


图 8 不同薄膜预应力情形下的载荷-位移曲线

Fig. 8 Loading-displacement curve on different film-preload conditions

由图 8 可知,不同薄膜预应力下的载荷-位移曲线是相似的,均呈现出先上升后下降的趋势。初始阶段,位移和载荷呈一种线性关系,结构处于弹性变形阶段。随后,在载荷变化不大的情况下,位移有明显的增加,曲线中出现多处转折点。分别取曲线斜率开始变化处 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 、 C_5 、 C_6 对应的载荷作为相应薄膜预应力下的连栋塑料温室结构极限承载

力,不考虑薄膜预应力的连栋塑料温室整体结构极限承载力为 0.65 N/mm,而 6 种薄膜预应力下的结构极限承载力分别为上述情况的 83%、60%、51%、45%、43%、37%,减小 17%~63%,这是由于薄膜预应力作为一种外部施加的初始应力,影响了连栋塑料温室结构的整体刚度,从而减小了结构极限承载力^[15-16]。

3 结论

(1) 有限元计算结果和实物模型试验结果相差

在 17.5% 以内,表明本文的建模方式和计算方法可行。

(2) 采用连栋塑料温室平面结构极限承载力作为设计值偏于保守,整体结构分析才可以反映出真实的屈曲性能。

(3) 在雪载荷工况下,薄膜预应力不影响连栋塑料温室结构的力学响应规律,但结构极限承载力会随薄膜预应力的增加而减小。

参 考 文 献

- 俞永华,王剑平,应义斌. 塑料温室拱结构雪载工况下极限承载力的非线性有限元分析[J]. 农业工程学报,2007,23(3):158~162.
Yu Yonghua, Wang Jianping, Ying Yibin. Nonlinear finite element analysis of the bearing capacity of arch structure in plastic greenhouse on snow load working condition [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(3): 158~162. (in Chinese)
- 郑金土,李扬,李丽,等. 连栋塑料温室连栋数对结构体系安全性和稳定性的影响[J]. 浙江大学学报:农业与生命科学版,2000,26(3):280~282.
Zheng Jintu, Li Yang, Li Li, et al. Multi-span plastic greenhouse structure safety and stability analysis in condition of different span-numbers[J]. Journal of Zhejiang University: Agric. & Life Sci., 2000, 26(3): 280~282. (in Chinese)
- 齐飞,童根树. 连栋温室钢结构框架稳定设计方法[J]. 农业工程学报,2009,25(9):202~209.
Qi Fei, Tong Genshu. Stability design methods for steel frame of agricultural gutter-connected greenhouse [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(9): 202~209. (in Chinese)
- 俞永华,王剑平,应义斌. 塑料温室薄膜承载性的非线性有限元分析[J]. 农业工程学报,2007,23(9):181~185.
Yu Yonghua, Wang Jianping, Ying Yibin. Nonlinear finite element analysis of the bearing capacity of the film in plastic greenhouse [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(9): 181~185. (in Chinese)
- 丁阳,白聚会,刘锡良. 大跨度钢-索-膜空间结构的计算方法[J]. 哈尔滨工业大学学报,2003,35(11):1377~1380.
Ding Yang, Bai Juhui, Liu Xiliang. Analysis of long span spatial steel-cable-membrane hybridized structures[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2003, 35(11): 1377~1380. (in Chinese)
- 沈祖炎,赵宪忠,陈以一,等. 大型空间结构整体模型静力试验的若干关键技术[J]. 土木工程学报,2001,34(4):102~106.
Shen Zuyan, Zhao Xianzhong, Chen Yiyi, et al. Some key technics for a static test of overall model of super spatial structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2001, 34(4): 102~106. (in Chinese)
- 刘自明. 桥梁结构模型试验研究[J]. 桥梁建设,1999(4):1~7.
- 祝效华,余志祥. ANSYS 高级工程有限元分析范例精选[M]. 北京:电子工业出版社,2004.
- 陈太聪,马海涛. 框架结构屈曲的精确有限元求解[J]. 力学学报,2009,41(6):953~960.
Chen Taicong, Ma Haitao. Exact finite element solutions of buckling analysis of frame structures [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2009, 41(6): 953~960. (in Chinese)
- 沈正炳,黄文彬. 多联栋温室框架结构的弹塑性计算[J]. 农业工程学报,2000,16(2):105~108.
Shen Zhengbing, Huang Wenbin. Elastic & plastic calculation of frame structure of gutter-connected greenhouse [J]. Transactions of the CSAE, 2000, 16(2): 105~108. (in Chinese)
- 冯虹,钱素萍. 索膜结构分析理论研究综述与展望[J]. 同济大学学报,2002,30(9):1033~1037.
Feng Hong, Qian Suping. Summarization and prospects for analysis of cable-membrane structures [J]. Journal of Tongji University, 2002, 30(9): 1033~1037. (in Chinese)
- 周长吉. 大型连栋温室设计风雪荷载分级标准初探[J]. 农业工程学报,2000,16(4):103~105.
Zhou Changji. Wind and snow load classification for greenhouse structure design [J]. Transactions of the CSAE, 2000, 16(4): 103~105. (in Chinese)
- 魏德敏,戴维茨. 张拉膜结构的有限元分析[J]. 力学与实践,2005,27(1):46~50.
Wei Demin, Dai Weiyang. Theoretical analyses of tension membrane structures [J]. Mechanics and Engineering, 2005, 27(1): 46~50. (in Chinese)

- University, 2001. (in Chinese)
- 4 肖望强,李威,韩建友. 非对称齿廓渐开线齿轮传热的热分析[J]. 农业机械学报, 2006, 37(12): 164~167.
Xiao Wangqiang, Li Wei, Han Jianyou. Thermal analysis of involute gear transmission with unsymmetric tooth profile [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(12): 164~167. (in Chinese)
 - 5 孙守群,朱卫光,赵玉香. 渐开线轮齿温度场影响因素分析[J]. 机械设计, 2009, 26(2): 59~62.
Sun Shouqun, Zhu Weiguang, Zhao Yuxiang. Analysis on the influencing factors of the temperature field of involute gears [J]. Journal of Machine Design, 2009, 26(2): 59~62. (in Chinese)
 - 6 张永红,苏华,刘志全. 行星齿轮传动系统的稳态热分析[J]. 航空学报, 2000, 21(5): 431~433.
Zhang Yonghong, Su Hua, Liu Zhiquan. Steady state thermal analysis of planetary transmission system [J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2000, 21(5): 431~433. (in Chinese)
 - 7 张永红,苏华,刘志全. 行星齿轮传动系统的瞬态热分析[J]. 航空学报, 2000, 21(6): 542~544.
Zhang Yonghong, Su Hua, Liu Zhiquan. Transient thermal analysis of planetary transmission system [J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2000, 21(6): 542~544. (in Chinese)
 - 8 李绍彬,李润方,林腾蛟. 行星齿轮传动装置内齿轮轮齿热有限元分析[J]. 机械传动, 2003, 27(1): 1~4.
Li Shaobin, Li Runfang, Lin Tengjiao. Thermal FEM analysis of gear tooth in planetary gear train [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2003, 27(1): 1~4. (in Chinese)
 - 9 蒋书运,祝书龙. 带滚珠丝杠副的直线导轨结合部动态刚度特性[J]. 机械工程学报, 2010, 46(1): 92~99.
Jiang Shuyun, Zhu Shulong. Dynamic characteristic parameters of linear guideway joint with ballscrew [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(1): 92~99. (in Chinese)
 - 10 王钦. 基于接触分析的齿轮建模和齿廓修形研究[D]. 大连:大连理工大学, 2008.
Wang Qin. Study on modeling and profile modification of helical gear based on contact analysis [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008. (in Chinese)
 - 11 Martins R, Seabra J, Brito A, et al. Friction coefficient in FZG gears lubricated with industrial gear oils: biodegradable ester vs mineral oil [J]. Tribology International, 2006, 39(7): 512~521.
 - 12 桂长林. 系统时变观点的齿轮胶合机理的求解思路[J]. 机械工程学报, 1995, 31(4): 6~17.
Gui Changlin. Computational thinking for gear scuffing based on the view-point of system and its time-variability [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 1995, 31(4): 6~17. (in Chinese)
 - 13 Gardon G, Astarita T, Carlomagno G M. Infrared heat transfer measurements on a rotating disk [J]. Optical Diagnostics in Engineering, 1996, 1(2): 1~7.
 - 14 Lin H T, Lin L K, Li C. Heat transfer from a rotating conical disk to fluids of any Prandtl number [J]. International Communication in Heat and Mass Transfer, 1987, 14(3): 323~332.
 - 15 Handschuh P F. Thermal behavior of spiral bevel gears [D]. Cleveland, OH: Case Western Reserve University, 1993.
 - 16 桂长林. 齿轮胶合的计算和试验研究[J]. 机械工程学报, 1995, 31(5): 1~12.
Gui Changlin. Study on calculating and test method for gear scuffing [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering 1995, 31(5): 1~12. (in Chinese)
 - 17 Long H, Lord A A, Gethin D T. Operating temperatures of oil-lubricated medium-speed gears: numerical models and experimental results [J]. Proc. IMechE, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2003, 217(2): 87~106.

(上接第 180 页)

- 14 蒋秀根,雷隽卿. 温室结构刚度及空间作用的简化计算方法[J]. 烟台大学学报:自然科学与工程版, 2002, 15(4): 286~291.
Jiang Xiugen, Lei Junqing. A simplified analysis method of the stiffness and space effectiveness of the greenhouse structure [J]. Journal of Yantai University: Natural Science and Engineering Edition, 2002, 15(4): 286~291. (in Chinese)
- 15 韦建刚,黄福云,陈宝春. 初应力对钢管混凝土单圆管拱极限承载力影响的研究[J]. 工程力学, 2010, 27(7): 103~112.
Wei Jiangan, Huang Fuyun, Chen Baochun. Research on the influence of initial stress to ultimate load carrying capacity of concrete filled steel tubular (single tube) arches [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(7): 103~112. (in Chinese)
- 16 剧锦三,郭彦林,刘玉擎. 拱结构的弹性二次屈曲性能[J]. 工程力学, 2002, 19(4): 109~112.
Ju Jinsan, Guo Yanlin, Liu Yuqing. A universal finite element method for predicting modulus of composites [J]. Engineering Mechanics, 2002, 19(4): 109~112. (in Chinese)