



徐开亮, 何芬, 侯永, 李艳, 张凌风, 刘龙. 果园防雷网系统内力分析及结构优化[J]. 中国农业大学学报, 2025, 30(9): 232-240.
XU Kailiang, HE Fen, HOU Yong, LI Yan, ZHANG Lingfeng, LIU Long. Internal force analysis and structural optimization of anti-hail nets in the orchard[J].
Journal of China Agricultural University, 2025, 30(9): 232-240.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.09.21

果园防雷网系统内力分析及结构优化

徐开亮^{1,2} 何芬^{1,2*} 侯永^{1,2} 李艳^{1,2} 张凌风^{1,2} 刘龙³

(1. 农业农村部规划设计研究院, 北京 100125;
2. 农业农村部农业设施结构与智能建造重点实验室, 北京 100125;
3. 陕西易盛建龙农业有限公司, 陕西 延安 716000)

摘要 针对果园防雷网建造不规范、安全性差等问题, 基于陕西延安地区的风雪、冰雹等荷载, 选用平面尺寸 30 m×90 m 的防雷网为 1 个控制单元, 利用 Sap2000 通用有限元分析软件构建模型, 计算分析最不利荷载组合下防雷网结构构件内力。在确保结构安全的条件下分析了扣除风雪荷载、增大端樑钢架立柱壁厚、向内倾斜端樑钢架立柱、改变端部开间长度等措施对结构内力大小和分布的影响, 获得防雷网结构的优化方法。结果表明: 1) 防雷网设计时, 冰雹荷载可用屋面活荷载进行包络设计; 当扣除风雪荷载时, 整体结构应力比明显下降, 除端樑钢架立柱外均满足承载力需求; 2) 端樑钢架立柱壁厚由 2.5 mm 增大至 4.0 mm 时, 弹性临界力可提升 50%, 应力比可减小 36%, 主体结构满足安全需求; 3) 端樑钢架立柱向内倾斜可减少立柱负荷, 钢架立柱倾斜 12°, 柱底向内侧平移约 1 m 时, 轴力减少约 15%; 4) 单侧端部开间长度由 20 m 减少至 15 m 时, 对应端樑钢架立柱轴力减少 7%, 另一侧端樑钢架立柱轴力减少 3%; 当两侧端部开间长度均减少 5 m 时, 端樑钢架立柱轴力均减少 10%。

关键词 防雷网; 荷载; 有限元分析; 结构优化

中图分类号 S26; TU261

文章编号 1007-4333(2025)09-0232-09

文献标志码 A

Internal force analysis and structural optimization of anti-hail nets in the orchard

XU Kailiang^{1,2}, HE Fen^{1,2*}, HOU Yong^{1,2}, LI Yan^{1,2}, ZHANG Lingfeng^{1,2}, LIU Long³

(1. Academy of Agricultural Planning and Engineering, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100125, China;
2. Key Laboratory of Farm Building in Structure and Intelligent Construction, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100125, China;
3. Shaanxi Yisheng Jianlong Agriculture Co., Ltd., Yan'an 716000, China)

Abstract Aiming at the problems of non-standard construction and poor safety of orchard anti-hail nets, based on the loads such as snow and hail in Yan'an of Shaanxi Province, an anti-hail net with a plane size of 30 m×90 m was selected as a control unit. The model was built using the finite element analysis software Sap2000 to calculate and analyze the internal forces of the structural members under the most unfavorable load combination conditions. Under the condition of ensuring structural safety, the effects of deducting wind and snow load, increasing the wall thickness of the end truss steel frame columns, tilting the end truss steel frame columns inward, and changing the length of the end gap on the magnitude and distribution of internal forces in the structure were analyzed. An optimization method for the anti-hail net structure was obtained. The results show

收稿日期: 2025-03-19

基金项目: 农业农村部规划设计研究院自主研发项目(QD202412); 农业农村部规划设计研究院农规英才项目(QNYC-2024-10)

第一作者: 徐开亮(ORCID:0009-0000-7656-2286), 工程师, 主要从事设施结构研究, E-mail: xukl2001@126.com

通讯作者: 何芬(ORCID:0000-0001-6033-3374), 正高级工程师, 主要从事设施园艺环境工程研究, E-mail: hefen_2005@163.com

that: 1) When designing the anti-hail net, the hail load can be enveloped by the roof live load for design; when deducting wind and snow loads, the overall structural stress ratio significantly decreases, and all except the end truss steel frame columns meet the bearing capacity requirements; 2) When the wall thickness of the end truss steel frame column increases from 2.5 mm to 4 mm, the elastic critical force is increased by 50%, and the stress ratio is reduced by 36%. The main structure meets the safety requirements; 3) The inward inclination of the end truss steel frame column reduces the load on the column. When the steel frame column is inclined at 12° and the bottom of the column moves inward by about 1.0 m, and the axial force is reduced by about 15%; 4) When the length of the single-sided end gap is reduced from 20 m to 15 m, the axial force of the corresponding end steel frame column decreases by 7%, and the axial force of the other end steel frame column decreases by 3%. When the length of the gap at both ends is reduced by 5 m, the axial force of the end truss steel column is reduced by 10%.

Keywords anti-hail net; load; finite element analysis; structural optimization

冰雹是果树生产的主要自然灾害之一,轻则使得树体枝叶受伤,重则造成毁园。雹灾的防控是果树生产的主要内容之一,运用防雹网可以阻止、缓冲冰雹对果树的危害,还可防止作物病害危害,降低作物内部空气温湿度,对果树生长发育、光合作用、呼吸作用、营养物质转运等生理过程存在影响,能够改善果树的抗逆性和果实品质^[1-6]。防雹网在实际应用中因缺乏设计依据,造成建造不规范,在极端天气之下容易倒塌,主要原因包括立柱下部基础过小、拱梁跨度大、坡度太小等^[7-8]。结构优化设计是提高防雹网抗灾能力的关键,目前国内对防雹网研究多集中在防雹网对果园环境及果实的影响及防雹网自动控制系统方面^[9-10],结构设计优化研究缺乏,关于防雹网设计建造相关的国家和行业标准空白。为得到防雹网整体最优结构参数,本研究基于延安地区的风雪、冰雹等荷载,使用有限元软件建立防雹网模型,分析最不利荷载组合下防雹网主体结构构件内力;在确保结构安全的条件下,分析扣除风雪荷载、增大端樘钢架立柱壁厚、向内倾斜端樘钢架立柱、改变端部开间长度对结构内力大小和分布的影响,以期获得防雹网结构的优化方法,为陕西延安地区防雹网设计建造优化提供理论依据。

1 防雹网结构选型

1.1 防雹网总体尺寸

本研究选定双坡型防雹网为研究对象,其横向钢架由立柱、水平梁、上下斜梁及横向斜拉索构成平面内稳定体系,通过纵向水平钢丝联结,并于端部设置纵向斜拉索保证纵向体系稳定。其中横向钢架立柱间距为4 m,纵向钢架间距为20 m;立柱地

面以上高度为5 m,埋入地下基础部分长度为1 m。立柱距地面4 m高处设水平梁,水平梁至柱顶间设上斜梁,横向钢架端部立柱在距地面高度3.5 m处至水平梁端部设下斜梁。由上斜梁形成双坡屋面,并布设纵向防雹网,防雹网通过固定环和绑绳与纵向水平钢丝联结,固定环纵向布置间距300~500 mm,中间形成一定的空隙,便于冰雹掉落,端部与上斜梁通过固定点连接;并在端樘钢架设置牵引电机及转向轮及纵向牵引钢丝,通过钢丝的牵引,以及固定环顺纵向水平钢丝的滑动,使防雹网完成开合等动作。防雹网1个控制单元的平面尺寸为30 m×90 m,包括横向钢架5樘,分别为端樘钢架1、中间樘钢架2、中间樘钢架3、中间樘钢架4、端樘钢架5,间距20 m;每樘含立柱6根,分别为立柱1~6,间距4 m,以及周边横向及纵向斜拉索向外扩展5 m。图1为防雹网1个控制单元的结构组成。

1.2 结构构件参数

本研究对陕西、山东、北京等地果园防雹网进行了调研,目前防雹网主要结构构件端樘钢架立柱、中间樘钢架立柱均为材质Q235、规格为 $\varphi 76 \times 2.5$ 的圆管;水平梁、上斜梁和下斜梁均为材质Q235、规格为 $\varphi 46 \times 1.2$ 的圆管;斜拉索和纵向水平钢丝是极限抗拉强度为1 570 MPa、直径分别为12和3 mm的钢丝绳;防雹网材质为高密度聚乙烯、孔洞11 mm。

1.3 荷载及荷载组合

防雹网主体结构按农业设施进行结构设计,设计工作年限一般不超过15 a,设计安全等级取3级。根据GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》^[11],因其自重较轻,不考虑地震作用。防雹网在实际使用中的荷载主要包括风、雪、冰雹及安装维护等荷载,其

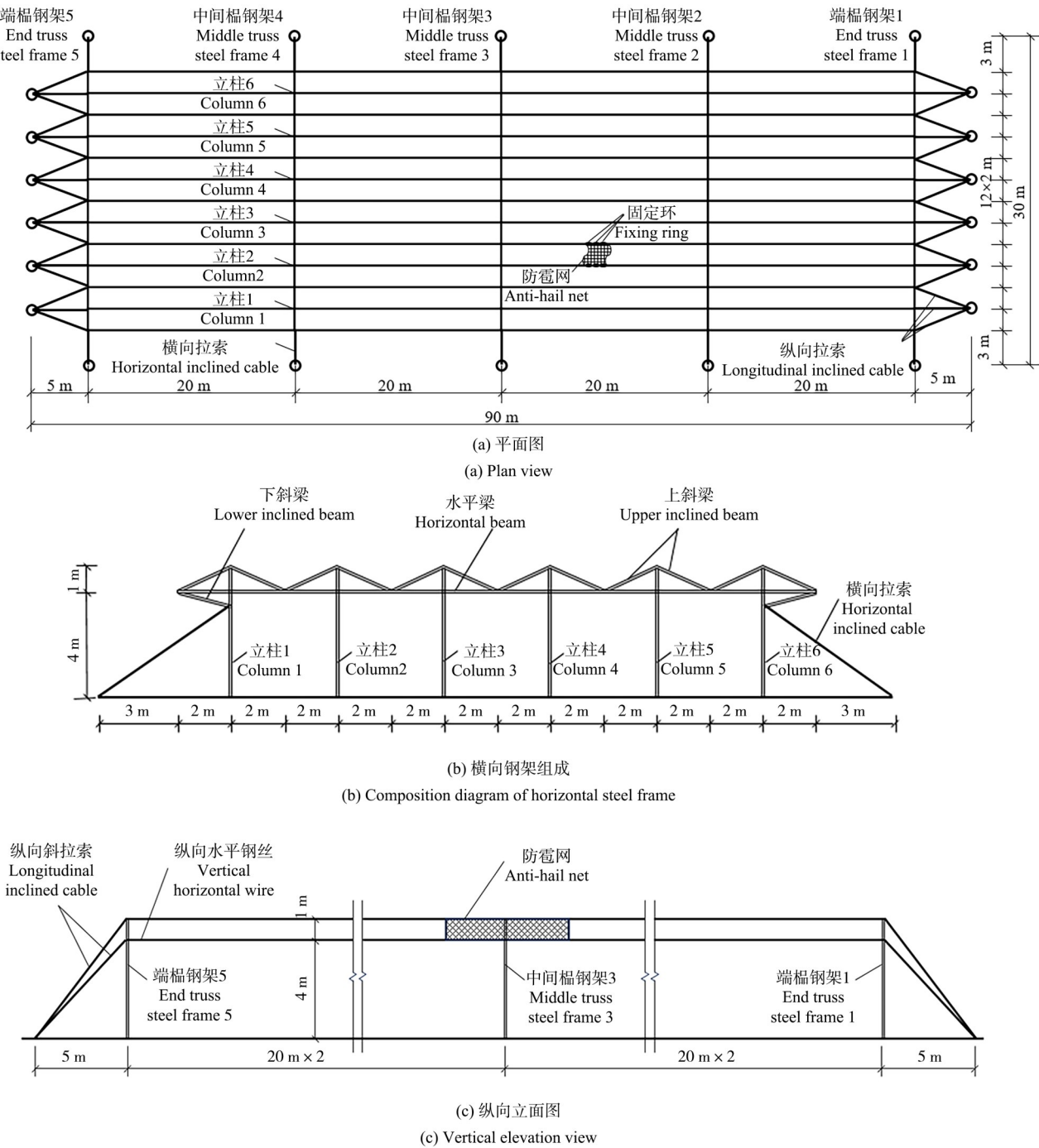


图1 防雷网控制单元
Fig.1 Control unit of anti-hail net

中冰雹是目标荷载。冰雹在下落过程中由重力加速对防雷网及张拉索的冲击效应,随冰雹直径大小的不同,撞击速度和撞击能量均有所变化^[12-13]。

本研究选取直径为40 mm的冰雹进行分析,其质量为30.2 g,撞击末速度26.3 m/s,冲击能量10.4 J^[14]。按单位时间单位面积内仅有1粒冰雹冲

击至防雷网上,对冰雹的冲击力通过动量公式进行转换。由于防雷网及钢丝绳等均为柔性材料,会延长与冰雹冲击的作用时间。单位时间取0.2 s,单位面积取0.04 m²,由动量定理可计算出单位面积内冰雹冲击的力为0.097 5 kN/m²,则冰雹荷载(H)标准值为0.097 5 kN/m²。

依据 GB/T 51183—2016《农业温室结构荷载规范》^[15]和 GB 50009—2012《建筑结构荷载规范》^[16]分析确定防雷网其他各项荷载。永久荷载(G)包括钢结构自重(G_1)和防雷网自重(G_2),其中防雷网质量 $45\text{g/m}^{2[7]}$,荷载标准值为 $0.441\times 10^{-3}\text{kN/m}^2$;屋面活荷载(L)标准值为 0.1kN/m^2 ;风荷载(W)标准值可根据延安地区 15 a 基本风压 0.25kN/m^2 、风压高度变化系数 0.76 、风荷载体型系数迎风面 1.02 、背风面 0.18 计算取值;延安地区 15 a 基本雪压 0.18kN/m^2 ,积雪分布系数 0.8 ,则均布雪荷载(S)标准值为 0.144kN/m^2 。通过综合分析得到防雷网的 3 种最不利荷载工况: $1.0G+1.0W+1.2\times 0.7S$ 、 $1.0G+1.2S+1.0\times 0.6W$ 和 $1.0G+1.2H$ 。

1.4 边界条件分析

防雷网的立柱基础多采用直径 $200\sim 300\text{ mm}$ 的圆柱形混凝土,埋深 1 m ,高出地面 $50\sim 200\text{ mm}$,主要是避免柱脚腐蚀损坏。此种形式可承担较大的轴力,无法承担弯矩,边界条件为铰接。斜拉索锚固采用圆柱形混凝土基础地埋,直径 $400\sim 500\text{ mm}$,埋深 1 m 。水平梁为定尺构件通长布置,2 根杆件交接处采用搭接或焊接处理,设定为通长连续。上、下斜梁为单根构件折弯后与立柱连接,

立柱柱顶以及斜梁下口处均设置纵向钢丝绳张紧,端部设斜拉索钢丝绳,连接形式均为铰接。

2 防雷网结构内力分析

2.1 结构内力分析软件

本研究结构内力分析采用 Sap2000 通用有限元软件。此软件适用范围广泛,可对集成化的通用结构进行分析与设计,适用于桥梁、工业和民用建筑、电力设施、农业设施等^[17-20],也可用于一些特殊结构的设计。软件建模和内力计算的基本步骤为:1)在 Sap2000 有限元软件中,绘制轴网线,定义材料与截面,建立三维模型;2)设置边界条件;3)定义荷载组合,施加荷载;4)计算分析得到主要构件的内力,设定相关参数,进行构件设计。

2.2 内力计算与分析

通过对防雷网控制单元建立模型,应用 Sap2000 有限元软件进行内力分析。在建模中,因钢丝绳等柔性材料几何刚度会随着加载过程中变形增大而不断变化,为此本研究采用考虑几何非线性效应及大变形效应的非线性分析。通过软件计算得出最不利工况($G+W+S$)下钢架立柱的应力比(计算应力与许用应力之比)和轴力,结果见表 1。

表 1 钢架立柱应力比和轴力
Table 1 Stress ratio and axial force of steel frame column

立柱编号 Column Number	端樑钢架 1 End truss steel frame 1		中间樑钢架 2 Middle truss steel frame 2		中间樑钢架 3 Middle truss steel frame 3		中间樑钢架 4 Middle truss steel frame 4		端樑钢架 5 End truss steel frame 5	
	应力比 Stress ratio	轴力/kN Axial force	应力比 Stress ratio	轴力/kN Axial force	应力比 Stress ratio	轴力/kN Axial force	应力比 Stress ratio	轴力/kN Axial force	应力比 Stress ratio	轴力/kN Axial force
立柱 1 Column 1	O/S	49.42	0.894	21.07	0.946	21.05	0.894	21.07	O/S	49.42
立柱 2 Column 2	O/S	42.12	0.907	20.5	0.941	20.49	0.907	20.5	O/S	42.12
立柱 3 Column 3	O/S	40.97	0.862	19.77	0.889	19.76	0.862	19.77	O/S	40.97
立柱 4 Column 4	O/S	40.97	0.862	19.77	0.889	19.76	0.862	19.77	O/S	40.97
立柱 5 Column 5	O/S	42.12	0.907	20.5	0.941	20.49	0.907	20.5	O/S	42.12
立柱 6 Column 6	O/S	49.42	0.894	21.07	0.946	21.05	0.894	21.07	O/S	49.42

注:O/S 指立柱轴力超越立柱弹性临界力较大,导致稳定计算中弯矩放大项的系数计算异常。
Note: O/S refers to that the axial force of the column exceeding the elastic critical force of the column, resulting in abnormal calculation of the coefficient of the moment amplification item in the stability calculation.

可见,端樑钢架立柱应力比严重超标,立柱压弯稳定计算超限,即主体结构无法满足全工况使用。由立柱平衡条件分析可知,端樑钢架立柱纵向一侧是水平拉索,另一侧为纵向斜拉索,基于柱顶节点平衡的需求,立柱除承担竖向荷载外,还需要承担纵向斜拉索的竖向分力,导致端樑钢架立柱的轴力普遍增大;同时由于横向斜拉索的附加轴力影响,立柱1至立柱6的轴力呈现边柱大并向中间扩散的形态。依据计算模型的立柱轴力分析,端樑钢架立柱3的轴力为40.97 kN,而立柱1的轴力扩大到了49.42 kN,远超弹性临界力28.85 kN。

3 防雷网结构优化分析

研究分析防雷网结构设计及内力分布特点发现,应力比超限主要体现在立柱上,其中轴力在应力比的构成中占绝对主导,因此在防雷网结构优化设计中要重点分析立柱轴力的变化及影响。在确保结构安全的条件下,研究分析扣除风雪荷载、增

大端樑钢架立柱壁厚、向内倾斜端樑钢架立柱、改变开间长度等对结构内力大小和分布的影响,从而得到防雷网结构的优化方法。

3.1 扣除风雪荷载对结构内力的影响

防雷网在风雪荷载共同作用下,整体结构荷载明显超限。实际工程中,风、雪工况下防雷网极易出现立柱折弯、倒塌、斜拉索拉出等破坏情况。随着气象预报技术和远程智慧控制的发展,防雷网可根据天气实时情况在短时间内实现铺放和收起。在遇到大雪天气时,可主动收起防雷网,避免防雷网上积雪以及由此带来的雨、雪混合工况对主体结构的破坏。为此在防雷网系统的设计中,可直接将雪、风荷载及其荷载组合剔除。通过软件计算得出扣除风雪荷载情况下钢架立柱的应力比和轴力见表2:相比于考虑风雪荷载的最不利工况,端樑钢架立柱应力比有明显改善,但端樑钢架立柱的轴力均超过弹性临界力,为此还需要通过其他优化方式,增大立柱承载力或减少立柱内力。

表2 扣除风雪荷载工况下钢架立柱应力比和轴力
Table 2 Stress ratio and axial force of steel frame column under the condition of deducting wind and snow load

立柱编号 Column Number	端樑钢架1 End truss steel frame 1		中间樑钢架2 Middle truss steel frame 2		中间樑钢架3 Middle truss steel frame 3		中间樑钢架4 Middle truss steel frame 4		端樑钢架5 End truss steel frame 5	
	应力比 Stress ratio	轴力/kN Axial force	应力比 Stress ratio	轴力/kN Axial force	应力比 Stress ratio	轴力/kN Axial force	应力比 Stress ratio	轴力/kN Axial force	应力比 Stress ratio	轴力/kN Axial force
立柱1 Column 1	O/S	36.82	0.599	14.39	0.608	14.38	0.599	14.39	O/S	36.82
立柱2 Column 2	1.354	31.33	0.605	13.95	0.621	13.95	0.605	13.95	1.354	31.33
立柱3 Column 3	1.307	31.02	0.576	13.43	0.589	13.43	0.576	13.43	1.307	31.02
立柱4 Column 4	1.307	31.02	0.576	13.43	0.589	13.43	0.576	13.43	1.307	31.02
立柱5 Column 5	1.354	31.33	0.605	13.95	0.621	13.95	0.605	13.95	1.354	31.33
立柱6 Column 6	O/S	36.82	0.599	14.39	0.608	14.38	0.599	14.39	O/S	36.82

3.2 增大端樑钢架立柱壁厚对结构内力的影响

防雹网整体结构的内力分布呈现区域特征明显且为对称分布(表 1),为此可依据内力分布的大小对结构构件进行差异化设计,大内力对应大构件,小内力对应小构件。由轴压构件稳定条件可知,增大立柱截面可增大其稳定系数或增大截面面积均可降低应力比,从而满足承载力的需求并且降低建造成本。增大立柱截面

等方法主要针对的是端樑钢架立柱,中间樑钢架立柱的内力相差不大。当端樑钢架立柱的壁厚由 2.5 mm 增至 4.0 mm 时,钢架立柱应力比见表 3。其弹性临界力为 43.48 kN,比原立柱截面的弹性临界力增加约 50%,应力比减小 36%,最大应力比为 1.029,考虑到钢管的冷弯制作过程的硬化冷弯效应,主体结构基本满足承载需求。

表 3 端樑钢架立柱壁厚由 2.5 mm 增至 4.0 mm 时钢架立柱应力比

Table 3 Stress ratio of end truss steel frame column when the wall thickness increases from 2.5 mm to 4.0 mm

立柱编号 Column Number	端樑钢架 1 End truss steel frame 1	中间樑钢架 2 Middle truss steel frame 2	中间樑钢架 3 Middle truss steel frame 3	中间樑钢架 4 Middle truss steel frame 4	端樑钢架 5 End truss steel frame 5
立柱 1 Column 1	1.029	0.599	0.608	0.599	1.029
立柱 2 Column 2	0.867	0.605	0.621	0.605	0.867
立柱 3 Column 3	0.843	0.576	0.589	0.576	0.843
立柱 4 Column 4	0.843	0.576	0.589	0.576	0.843
立柱 5 Column 5	0.867	0.605	0.621	0.605	0.867
立柱 6 Column 6	1.029	0.599	0.608	0.599	1.029

3.3 向内倾斜端樑钢架立柱对结构内力的影响

端樑钢架立柱由于额外承担纵向斜拉索的竖向分力,导致轴压力超限,承载力不足,为此可通过调整立柱布置,使立柱柱底向内侧偏移,改变其柱顶平衡条件,从而减小其承担的轴力。端樑钢架立柱向内倾斜,柱顶间距保持 20 m 不变,端部开间的柱底距离缩短。倾斜角度为 6°,对应柱底向内移动的水平距离约 0.523 m,倾斜 12°时柱底向内移动的水平距离 1.04 m,倾斜 18°时柱底向内移动的水平距离为 1.545 m。由于仅调整了端樑钢架立柱,对中间樑钢架立柱的轴力影响很小。端樑钢架立柱倾斜不同角度后,其轴力及变化率结果见表 4。可见,端樑立柱轴力均有降低,随倾斜角度的增大,轴力逐渐减小,且随角度增大,轴力减小的幅度也在逐渐减小。基于内力减少的需求以及种植面积的

影响,建议倾斜 12°左右较为合适。

3.4 改变端部开间长度对结构内力的影响

开间长度直接影响立柱荷载,可通过减小端部开间长度减少端樑立柱的内力。考虑 2 种端部开间长度变化方案:

方案 A,仅移动端樑钢架 1,使其向内侧移动 5 m,即第 1 个开间长度由 20 m 调整为 15 m;

方案 B,同时移动端樑钢架 1 和端樑钢架 5,使其向内侧移动 5m,第 1 个开间和第 4 个开间长度由 20 m 调整为 15 m。

2 种开间长度调整情况下立柱轴力的变化见表 5。对轴力进行分析发现,中间樑钢架立柱轴力基本无变化,端樑钢架立柱轴力减少。单侧端樑钢架内移,2 个端樑钢架立柱的轴力均有减小,其中被移动的端樑钢架立柱轴力减小 7%,未移动的端樑钢架

表4 不同倾斜角度下端樑钢架立柱轴力和轴力变化率

Table 4 Axial force and axial force change rate of end truss steel frame column under different inclination angle								
立柱编号 Column number	$\alpha=0^\circ$		$\alpha=6^\circ$		$\alpha=12^\circ$		$\alpha=18^\circ$	
	轴力/kN Axial force	变化率 Change rate	轴力/kN Axial force	变化率 Change rate	轴力/kN Axial force	变化率 Change rate	轴力/kN Axial force	变化率 Change rate
立柱1 Column 1	36.87	0	33.65	0.087	31.30	0.070	29.60	0.054
立柱2 Column 2	31.34	0	28.59	0.088	26.58	0.070	25.13	0.055
立柱3 Column 3	31.04	0	28.34	0.087	26.37	0.070	24.94	0.054
立柱4 Column 4	31.04	0	28.34	0.087	26.37	0.070	24.94	0.054
立柱5 Column 5	31.34	0	28.59	0.088	26.58	0.070	25.13	0.055
立柱6 Column 6	36.87	0	33.65	0.087	31.30	0.070	29.60	0.054

注: α 为端樑钢架立柱倾斜角度。
Note: α is the inclination angle of the end truss steel frame column.

表5 2种开间长度调整情况下的立柱轴力

Table 5 Axial force of steel frame column under the condition of changing the length of two end bays										kN
立柱编号 Column number	端樑钢架1 End truss steel frame 1		中间樑钢架2 Middle truss steel frame 2		中间樑钢架3 Middle truss steel frame 3		中间樑钢架4 Middle truss steel frame 4		端樑钢架5 End truss steel frame 5	
	方案A Plan A	方案B Plan B	方案A Plan A	方案B Plan B	方案A Plan A	方案B Plan B	方案A Plan A	方案B Plan B	方案A Plan A	方案B Plan B
立柱1 Column 1	34.43	33.17	12.68	12.68	14.39	14.39	14.39	12.68	35.80	33.17
立柱2 Column 2	29.06	28.05	12.27	12.26	13.95	13.95	13.95	12.26	30.49	28.05
立柱3 Column 3	28.85	27.83	11.79	11.79	13.43	13.43	13.43	11.79	30.18	27.83
立柱4 Column 4	28.85	27.83	11.79	11.79	13.43	13.43	13.43	13.43	30.18	27.83
立柱5 Column 5	29.06	28.05	12.27	12.27	13.95	13.95	13.95	13.95	30.49	28.05
立柱6 Column 6	34.43	33.17	12.68	12.68	14.39	14.39	14.39	14.39	35.80	33.17

立柱轴力减小3%;当2个端樘钢架均向内侧偏移时,端樘钢架立柱轴力均减小10%。

4 结 论

本研究以平面尺寸为30 m×90 m的防雹网控制单元为研究对象,利用Sap2000通用有限元分析软件构建模型,计算分析最不利荷载组合工况下的防雹网结构构件内力,在确保结构安全的条件下分析了扣除风雪荷载、增大端樘钢架立柱壁厚、向内倾斜端樘钢架立柱、改变端部开间长度等对结构内力大小和分布的影响,得出如下结论:

1)防雹网设计时,冰雹荷载可用屋面活荷载进行包络设计;当扣除风雪荷载时,整体结构应力比明显下降,除端樘钢架立柱外均满足承载力需求。

2)端樘钢架立柱壁厚由2.5 mm增至4.0 mm时,弹性临界力可提升50%,应力比可减小36%,主体结构满足安全需求。

3)端樘钢架立柱内倾可减少立柱负荷,钢架立柱倾斜12°,柱底向内侧平移约1 m时,轴力减少约15%。

4)单侧端部开间长度由20 m减少至15 m时,对应端樘钢架立柱轴力减少7%,另一侧端樘钢架立柱轴力减少3%;两侧端部开间长度均减少5 m时,端樘钢架立柱轴力均减少10%。

参考文献 References

- [1] 白岗柱,杜社妮,李明霞,耿桂俊,闫亚丹. 防雹网对果园立地环境及苹果生长的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(3): 255-261
Bai G S, Du S N, Li M X, Geng G J, Yan Y D. Influence of anti-hail net on the habitat and growth of apple[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(3): 255-261 (in Chinese)
- [2] Kalsits L, Musacchi S, Layne D R, Schmidt T, Mupambi G, Serra S, Mendoza M, Asteggiano L, Jarolmasjed S, Sankaran S, Khot L R, Espinoza C Z. Above and below-ground environmental changes associated with the use of photosensitive protective netting to reduce sunburn in apple [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 237-238: 9-17
- [3] Boini A, Bortolotti G, Perulli G D, Venturi M, Bonora A, Manfrini L, Corelli Grappadelli L. Gala apple production benefits from high shading levels and water limitation, under exclusion netting[J]. *Scientia Horticulturae*, 2023, 310: 111756
- [4] 储宝华. 不同颜色的防雹网对苹果树生长和果实品质的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022
Chu B H. The influence of anti-hail nets with different color on apple tree growth and fruit quality[D]. Yangling: Northwest Agriculture & Forestry University, 2022 (in Chinese)
- [5] 汪志威,宋福兵,周玉萍,李秀亚,胡秋龄,钟彩虹. 防雹网对东红猕猴桃生育期生长指标和叶片病害的影响[J]. 果树学报, 2024, 41(11): 2358-2367

- Wang Z W, Song F B, Zhou Y P, Li X Y, Hu Q L, Zhong C H. Effect of anti-hail nets on the growth and leaf diseases of Donghong kiwifruit during growing period[J]. *Journal of Fruit Science*, 2024, 41(11): 2358-2367 (in Chinese)
- [6] 傅一凡,王周倩,邱栋梁,黄文俊,钟彩虹. 防雹网对‘东红’猕猴桃果实耐贮性和品质的影响[J]. 植物科学学报, 2024, 42(4): 533-542
Fu Y F, Wang Z Q, Qiu D L, Huang W J, Zhong C H. Effects of anti-hail nets on storage performance and quality of *Actinidia chinensis* Planch. ‘Donghong’[J]. *Plant Science Journal*, 2024, 42(4): 533-542 (in Chinese)
- [7] 郑霞. 果树防雹网应用中出现的问题与规范化搭建[J]. 北方果树, 2022(4): 37-38
Zheng X. Problems in the application of hail suppression net for fruit trees and its standardized construction[J]. *Northern Fruits*, 2022(4): 37-38 (in Chinese)
- [8] 宋小燕. 甘肃泾川矮化苹果园防雹网建设存在问题与对策[J]. 西北园艺: 果树, 2022(2): 58-59
Song X Y. Problems and countermeasures in the construction of hail prevention network in dwarf apple orchard in Jingchuan, Gansu province[J]. *Northwest Horticulture: Fruit Trees*, 2022(2): 58-59
- [9] 赵新平,穆岩,李世雄,武高辉,韩祥,郭朋飞. 果园防雹网自动控制系统的设计与实践[J]. 现代农业科技, 2019(4): 146-148
Zhao X P, Mu Y, Li S X, Wu G H, Han X, Guo P F. Design and practice of automatic control system for orchard anti-hail net [J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2019(4): 146-148 (in Chinese)
- [10] 张栗宇. 基于云的智能防雹网系统及大数据平台关键技术研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2024
Zhang L Y. Research on key technologies of cloud-based intelligent anti-hail nets system and big data platform [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2024 (in Chinese)
- [11] GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑出版社, 2010
GB 50011—2010 Code for seismic design of buildings[S]. Beijing: China Architecture Press, 2010 (in Chinese)
- [12] 龙彦文,戴益民,杨伟元. 冰雹冲击温室屋面玻璃荷载的数值模拟研究[J]. 湖南工程学院学报: 自然科学版, 2024, 34(2): 90-94
Long Y W, Dai Y M, Yang W Y. Numerical simulation study on the impact of hail on greenhouse roof glass [J]. *Journal of Hunan Institute of Engineering: Natural Science Edition*, 2024, 34(2): 90-94 (in Chinese)
- [13] 丁敏,施旭栋,周蕊,邓小环,蒋秀根. 冰雹冲击下温室玻璃破损情景数值模拟[J]. 农业工程学报, 2012, 28(1): 202-207
Ding M, Shi X D, Zhou R, Deng X H, Jiang X G. Numerical simulation on damage behavior of greenhouse glass under hail impact[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(1): 202-207 (in Chinese)
- [14] 潘一恒. 膜结构在冰雹载荷下的力学响应研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2023
Pan Y H. Study on mechanical response of membrane structures under hail load[D]. Zhengjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2023 (in Chinese)
- [15] GB/T 51183—2016 农业温室结构荷载规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2016
GB/T 51183—2016 Code for the design load of horticultural greenhouse structures[S]. Beijing: China Planning Press, 2016 (in Chinese)
- [16] GB 50009—2012 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012
GB 50009—2012 Load code for the design of building structures[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012 (in Chinese)
- [17] 宋业春,刘帅,王吉豪,李思昊,贾丽. 基于SAP2000的超大截面梁支撑体系施工与数值模拟[J]. 建筑结构, 2022, 52(S1): 3062-3067

- Song Y C, Liu S, Wang J H, Li S H, Jia L. Construction and numerical simulation of super large section beam support system based on SAP2000[J]. *Building structure*, 2022, 52(S1): 3062-3067 (in Chinese)
- [18] 柯长仁, 姚东浩. 基于SAP2000的框剪结构抗连续倒塌研究[J]. 湖北工业大学学报, 2021, 36(2): 86-90
- Ke C R, Yao D H. Research on the continuous collapse resistance of frame shear structure based on SAP2000[J]. *Journal of Hubei University of Technology*, 2021, 36(2): 86-90 (in Chinese)
- [19] 徐敏, 潘尚杰, 范健康. 基于SAP2000的小高层建筑结构抗震性能分析[J]. 河南城建学院学报, 2019, 28(6): 16-21
- Xu M, Pan S J, Fan J K. Seismic performance analysis of small high-rise building based on SAP2000[J]. *Journal of Henan University of Urban Construction*, 2019, 28(6): 16-21 (in Chinese)
- [20] 曹宇轩, 王志涛. 基于SAP2000的傅式谱对结构地震响应的影响研究[J]. 武汉理工大学学报:交通科学与工程版, 2022, 46(1): 129-135
- Cao Y X, Wang Z T. Study on the influence of Fourier spectrum on structural seismic response based on SAP2000[J]. *Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science & Engineering*, 2022, 46(1): 129-135 (in Chinese)

责任编辑: 刘迎春



第一作者简介: 徐开亮, 工程师。主要从事设施农业结构设计咨询工作, 主持或参与国家及地方科研项目10余项, 结构设计咨询项目100余项, 发表论文10余篇。



通讯作者简介: 何芬, 博士, 正高级工程师。长期从事设施园艺环境调控技术、智能生产装备研究及农业工程设计咨询工作, 主持或参加国家和省部级科研项目30余项, 发表论文50余篇, 主编或参编著作5部, 制定行业、团体和企业标准10余项, 授权专利30件、软件著作权12项。