

三连拱温室受风雪荷载时的结构计算

宋 占 军^①

(中国农业大学工程基础科学部)

摘 要 建立 1 个主架和 4 个次架相间排列的三连拱温室受风、雪荷载时的计算模型,阐述了它的计算方法;同时对规范中没有说明的附加风压力、附加风吸力、风载高度变化因数和多连拱型屋面的风载体型因数作了分析。根据计算结果提出了改进温室结构设计的建议。

关键词 温室;结构设计;计算模型;计算方法

中图分类号 TU261

Calculation on Structure of Tri-arch Greenhouse Under Wind and Snow Load

Song Zhanjun

(College of Applied Engineering Science, CAU)

Abstract The structure calculation model of a tri-arch greenhouse under wind and snow load is developed. The additional wind pressure, the additional suction and the height changing factor of wind load as well as the shape factor of wind load for multiarch roof coverings, which are not yet mentioned in the current constructional standards, are analyzed. Based on the calculation results, some suggestions for the improvement of the greenhouse structure design are provided.

Key words greenhouse; structure design; calculating model; calculating method

目前,多连拱温室越来越多,其中比较普遍地采用了加强架和普通架(或称主架和次架)相间排列的结构形式。这种温室结构的设计计算还存在不少问题:首先,我国尚无温室设计规范可循,而主要参照工民建规范^[1],往往导致温室结构过于笨重,而且对于多连拱温室风载计算所必需的一些基本参数,在工民建规范^[1]中也无可借鉴之处;其次,对于这种温室,应怎样选取计算模型,当既考虑风载又考虑雪载时选取什么样的拱轴线受力最优,温室设计何时取决于雪载、何时取决于风载……都值得研究。本文旨在通过对主、次架相间排列的三连拱型温室进行具体分析计算,建立计算模型,并提出有关这类温室结构设计的某些建议。

1 计算模型的建立

图 1 为具有 1 个主架和 4 个次架相间排列的拱轴为抛物线的三连拱温室的结构示意图。

收稿日期:1997-07-15

^①宋占军,北京清华东路 17 号 中国农业大学(东校区)75 信箱,100083

受雪载或横向风载(风向垂直于温室纵向)作用时,因有主、次拱架之分,故应把沿温室横向取出 $m-m$ 和 $n-n$ 这 2 个截面截取的部分作为计算对象。该计算部分有 $x-x$ 和 $y-y$ 这 2 个对称面,应用结构力学方法^[2] 2 次取半,可得到该计算部分的 1/4 结构(图 1(a) 中的 1—C—75—72 部分),其立体图如图 2 所示(图中标出了部分结点号和单元号,左半结构与右半结构对称编号)。其中,在 $y-y$ 截面所截断的构件的结点 1, 2, 3 各处,其支承要求分 2 种情况确定:载荷对称于 $y-y$ 截面时, $L_x = 0$, $L_y \neq 0$, $L_z \neq 0$, $\theta_x \neq 0$, $\theta_y = 0$, $\theta_z = 0$ (这里 L_x , L_y 和 L_z 分别为结点沿 x , y 和 z 轴的线位移; θ_x , θ_y 和 θ_z 分别为结点处的截面绕 x , y 和 z 轴转动的角位移);载荷反对称于 $y-y$ 截面时, $L_x \neq 0$, $L_y = 0$, $L_z = 0$, $\theta_x = 0$, $\theta_y \neq 0$, $\theta_z \neq 0$ 。 $x-x$ 截面所截构件的结点 10, 23, 27, 40, 59, 72, 76 和 $m-m$ 截面所截构件的结点 13, 26, 30, 43, 62, 75, 79 处的支承,因为雪载或风载均可视为对称于 $x-x$ 截面或 $m-m$ 截面,所以都按对称结构受对称载荷作用的情况处理,即 $L_x \neq 0$, $L_y = 0$, $L_z \neq 0$, $\theta_x = 0$, $\theta_y \neq 0$, $\theta_z = 0$ 。

温室用材:主拱架为矩形钢管 $60 \times 40 \times 2.75$;次拱架为薄壁钢管 $\phi 22 \times 1.2$;纵杆 27—30, 59—62, 72—75 和 76—79 为钢管 $\phi 30 \times 1.8$,其余纵杆均为 $\phi 22 \times 1.2$;水平拉杆单元⑨⑦~⑩②为 $\phi 18 \times 1.0$ (风载作用时,这些水平拉杆受压,易失稳,故不计入)。

2 载荷的确定

2.1 雪载

参照文献[1],屋面水平投影面上的雪压标准值按下式计算:

$$p_{sn} = \mu_r p_{s0} \quad (1)$$

式中: p_{sn} 为标准雪压, kPa; μ_r 为屋面积雪分布因数; p_{s0} 为基本雪压, kPa。以当地一般空旷平坦地面上统计所得 30 a 一遇的最大积雪确定,按全国积雪分布图,对于北京地区,取 $p_{s0} = 0.30$ kPa。

将文献[1]中的双跨情况的积雪分布因数推广到三连跨情况。由于本温室的矢跨比 $f/l = 1.5/6 > 0.1$,因此积雪为均布和不均布情况都要考虑。对于不均布情况, μ_r 要依坡屋面与水平面的夹角 α 决定。对于拱形屋面, α 为拱顶和拱肩连接面与水平面所构成的角^[3]。本温室 $\alpha = 26.56^\circ$,按文献[1]所给数据,插值算得 $\mu_r = 0.98$,应用结构力学方法取半,再由式(1)算得标准

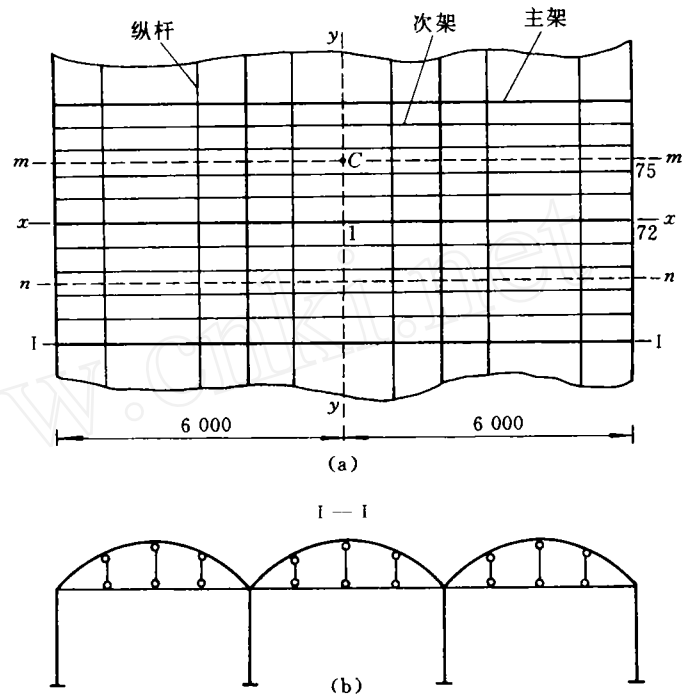


图 1 三连拱温室结构示意图

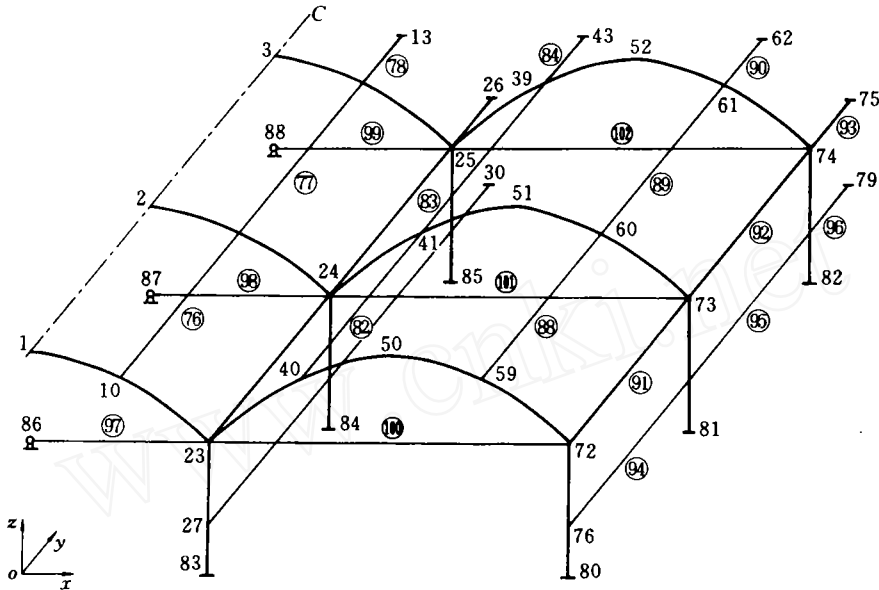


图 2 三连拱温室计算模型

雪压 p_{sn} , 化为拱架的线载荷, 得到雪载 q_s 。图 3 示出积雪不均布情况下雪载 q_s 的数值(括号外为 1/2 主架的, 括号内为次架的, 下同)。计算表明, 在所选拱轴线条件下积雪不均布情况较严重。

2.2 风载

参照文献[1], 垂直于温室外表面上的标准风压为

$$p_{wn} = \beta \mu_h \mu_b p_{w0} \quad (2)$$

式中: p_{wn} 为标准风压, kPa; β 为风振因数, 对于温室, 取 $\beta = 1$; μ_h 为风压高度变化因数; μ_b 为风压体型因数; p_{w0} 为基本风压, kPa, 系以当地比较空旷平坦地面上离地 10 m 高处统计的 30 a 一遇

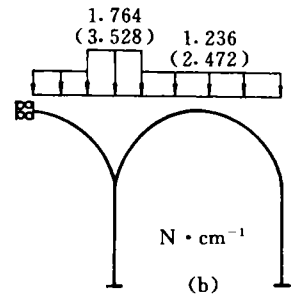


图 3 雪载 $q_s / (N \cdot cm^{-1})$

10 s 平均最大风速 $v_{max} / (m \cdot s^{-1})$ 为标准, 按公式 $p_{w0} = v_{max}^2 / 1600$ 确定的。按全国基本风压分布图, 对于北京地区, 取 $p_{w0} = 0.35$ kPa, 相当于 9 级风的。

风压高度变化因数 μ_h 。一般温室建在田野、乡村、丛林、丘陵以及房屋比较稀疏的中小城镇和大城市郊区, 这属于规范[1]所说的 B 类地区, 但规范给出的最小高度为 5 m 时的 $\mu_h = 0.8$; 对于高度只有 3.8 m 的温室, 显然不能满足计算要求, 故按文献[4]给出的如下公式计算:

$$\mu_h = (H/h_T)^{2a'} \times 35^{0.32}$$

式中: h_T 为梯度风高度, 对于 B 类地区, 取 $h_T = 350$ m; a' 为地面粗糙度因数, 对于 B 类地区, 取 $a' = 0.16$ 。求得: 温室侧墙高 $H = 2.3$ m 时, $\mu_h = 0.625$; 温室顶高 $H = 3.8$ m 时, $\mu_h = 0.734$ 。

风压体型因数 μ_b 。对于多连拱形屋面, 在工民建规范[1]中没有可借鉴的数据, 因此, 按农业部规划设计院设施农业研究所编辑的《温室结构技术条件》(以下简称《技术条件》), 对三连拱形屋面所取的风载体型因数, 如图 4 所示。为了与前述取半的计算模型相对应, 将图 4 所示的体型因数分解为对称于 z 轴和反对称于 z 轴两部分的叠加, 再分别取半, 得到相应的半结构的体型因数。

由式(2)求得温室外表面所受的标准风压,化为拱架载荷,得到如图5所示的风载 q_w 。风载不仅会作用在温室外表面,而且对室内空气压力也会有影响,即形成附加风压力。对此,工民建规范^[1]中无可参照,现根据《技术条件》中的数据,计算时采用室顶高处风压的1/5作为附加风载。

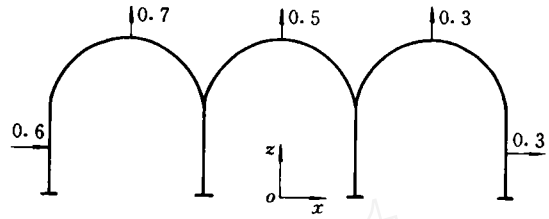


图4 风压体型因数 μ_b

3 荷载组合的确定

按文献[1],温室的安全等级取二级,结构重要性因数取1,即不考虑它的影响。对于冷弯型薄壁钢结构,有2类荷载组合:当按承载能力极限状态设计时,考虑荷载效应的基本组合,采用

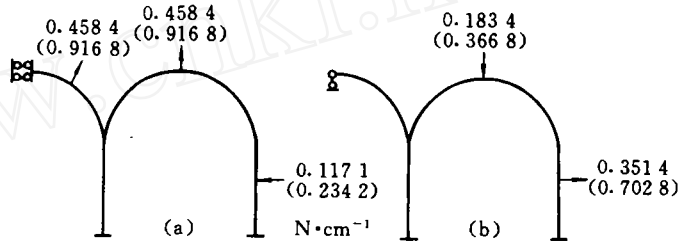


图5 风载 $q_w/(N \cdot cm^{-1})$

荷载设计值和设计强度进行计算;当按正常使用极限状态设计时,考虑荷载的短期效应组合,采用荷载标准值和容许变形进行计算^[5]。现对这2类组合的关系作如下分析。

由文献[1],荷载效应的基本组合公式为

$$S = \nu_g C_g G + \Psi \sum_{i=1}^n \nu_{qi} C_{qi} Q_i$$

荷载短期效应组合公式为

$$S_s = C_g G + C_{q1} Q_1 + \sum_{i=2}^n C_{qi} \Psi_{si} Q_i$$

式中: ν_g, ν_{qi} 为永久和可变荷载的分项因数,分别为1.2(1.0)和1.4,当永久荷载在荷载组合中对结构不利时取 $\nu_g = 1.2$,有利时取 $\nu_g = 1.0$; C_g, C_{qi} 为永久和可变荷载的效应因数,它是结构或构件中的效应(如内力、应力等)与该效应的荷载的比值; G 为永久荷载的标准值, Q_1 和 Q_i 为可变荷载的标准值; Ψ 为可变荷载的组合因数,当有2个或2个以上可变荷载参与组合其中包括风载时,取0.85,其他情况取1.0; Ψ_s 为荷载短期效应时可变荷载的组合因数,当有风载参与组合时,取0.6,其他情况取1.0。

由于结构设计是在弹性工作区进行的,荷载产生的效应可以线性叠加,因此,总效应可以由总荷载一次算得,即 $S = CF$,其中 S 为总效应, C 为比例因数, F 为总荷载。基本组合荷载为

$$F = \nu_g G + \Psi \sum_{i=1}^n \nu_{qi} Q_i \tag{3}$$

短期效应组合荷载为

$$F_s = G + Q_1 + \sum_{i=2}^n \Psi_{si} Q_i \tag{4}$$

比较公式(3)和(4)可见,基本组合荷载大于短期效应组合荷载,因此,如果按基本组合荷载计算能满足正常使用极限状态要求,则不需计算短期效应组合。

对于本温室,考虑的永久荷载有自重;可变荷载有雪载、风载、附加风压力、附加风吸力和

作物吊重荷载。按文献[3], 雪载和风载不应同时参与组合; 作物吊重荷载为 0.15 kPa, 水平均匀。由计算比较可知, 本温室严重的荷载基本组合如下:

第 1 种组合 荷载设计值 = 自重荷载 + 0.85 × (1.4 × 风载 + 1.4 × 附加风压力)

第 2 种组合 荷载设计值 = 1.2 × 自重荷载 + (1.4 × 雪载 + 1.4 × 作物吊重荷载)

4 结果与分析

采用自编的空间杆系-悬索混合结构有限元程序(SZJK3)对上述温室进行了计算, 给出了温室结构各单元在其局部坐标系 $x'y'z'$ 中表示的杆端的轴力、扭矩、弯矩、剪力和按第四强度理论计算的应力^[6], 给出了各结点在整体坐标系 xyz 中表示的结点线位移和结点处截面角位移(单元局部坐标系和结构整体坐标系, 对右半结构取右手坐标系, 对左半结构取左手坐标系)。为省篇幅, 对于第 1 种组合只绘出受力严重的左半结构中较大的内力分量 M_y 图(图 6)和

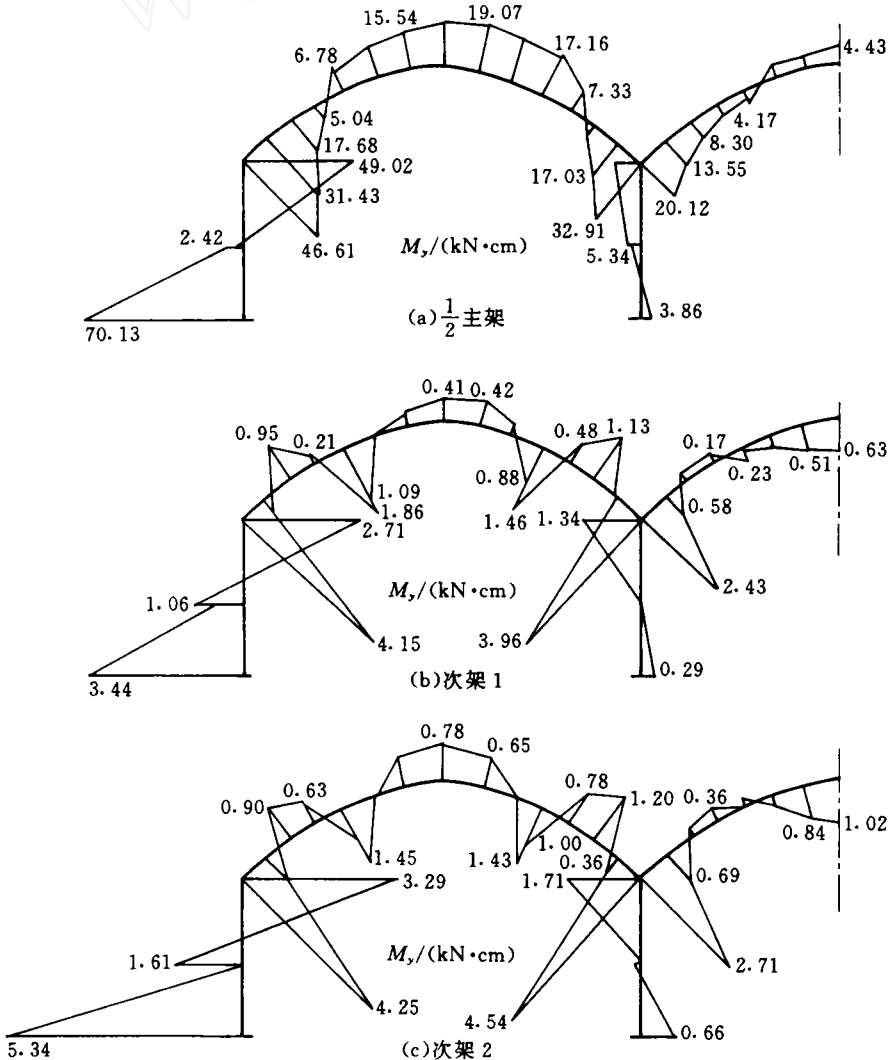


图 6 拱架在第 1 种组合时的弯矩图

受力严重的迎风一侧三纵杆中 72—75 纵杆的主要内力分量 M_z 图(图 7)。在左半结构的结点 75 处有最大水平位移 2.3 cm, 在结点 52 处有最大竖向位移 1.9 cm。单元⑨的首端结点 72 处有最大应力 $\sigma_{\max} = 189.9 \text{ MPa}$, 小于设计强度 $[\sigma] = 205.0 \text{ MPa}$ ^[5]。对于第 2 种组合, 拱架中较大内力分量弯矩是 M_y 、轴力 N 。受力严重的天沟处两侧纵杆中较大内力分量是 M_y 和 M_z 。在结点 39 处有最大水平位移 0.7 cm 和最大竖向位移 0.9 cm, 单元⑩的首端结点 40 处有最大应力 $\sigma_{\max} = 123.3 \text{ MPa}$, 小于设计强度。

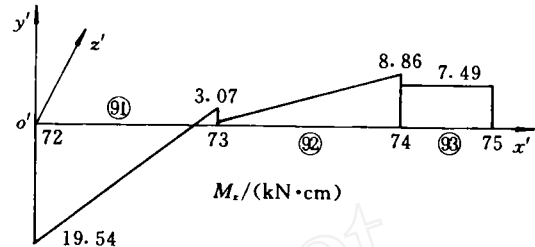


图 7 纵杆的弯矩图

从计算结果可以看出该温室有如下受力特性:

1) 次架 2 的内力比次架 1 大, 而主架的内力比次架大得多, 特别是风载作用时, 要大过许多倍。说明在抗载中主架起主要作用, 而各次架所起作用也各不相同。

2) 纵杆在纵向联接了主架和次架, 这种联接还起着更重要的承力作用——主架通过纵杆特别是迎风一侧的 3 根纵杆, 受雪载时特别是通过天沟两侧的 2 根纵杆, 支承了次架, 增强了次架的抗载能力; 次架 2 离主架较次架 1 远, 传力路程远, 因此内力和位移比次架 1 大。从图 6 也可看到, 受风载时边跨拱肩部结点处弯矩平衡上有较大差值, 说明纵杆还受有较大的扭矩。

3) 边跨拱架外侧立柱和 3 条纵杆, 特别是迎风一侧的立柱和纵杆, 比内部各立柱和纵杆所受的力要大许多, 因此, 为节省材料, 立柱和纵杆的设计可取不同横截面。

4) 受雪载时拱轴线形状对结构内力的影响, 比受风载时大。例如本温室拱轴为抛物线时, 积雪不均布情况下的最大应力为 91.3 MPa (结点 25 处), 当拱轴为圆弧线时, 则为 197.4 MPa (结点 39 处), 相差 1 倍之多。原因是: 对于主要是水平均布的雪载, 抛物线接近合理拱轴线, 拱架弯矩小。在风载作用下, 拱轴为上述 2 种曲线时的最大应力分别为 189.9 和 192.6 MPa, 相差较小。基于这种特性, 温室拱轴线形状可主要根据雪载设计。

5) 当基本雪压为 0.50 kPa 时, 本温室最大应力为 200.2 MPa, 与基本风压为 0.35 kPa 时相近。由于结构处在弹性工作区, 因此可以推断, 在合理选择拱轴线的条件下, 当基本雪压约为基本风压的 1.4 倍时, 风载和雪载作用下的应力水平近似相同, 即当基本雪压比基本风压大过 40% 时温室结构的最大应力才根据雪压决定。由全国基本风压和基本雪压分布图^[1]可知, 只有东北东部和新疆北部个别地区的风压符合这种情况, 因此在本文中所考虑的载荷种类范围内, 对于我国绝大部分地区, 多连拱温室结构的应力水平一般可根据风载确定。

参 考 文 献

- 1 中国建筑工业出版社编辑部. 现行建筑结构规范大全(1). 北京: 中国建筑工业出版社, 1991. 6. 7~6. 12, 6. 28~6. 50
- 2 龙驭球, 包世华. 结构力学教程(上册). 北京: 高等教育出版社, 1987. 259~263
- 3 日本设施园艺协会. 园艺设施结构安全标准. 叶淑娟译. 北京: 农业出版社, 1989. 6~15
- 4 张相庭. 结构风压和风振计算. 上海: 同济大学出版社, 1985. 1~37
- 5 中国建筑工业出版社编辑部. 现行建筑结构规范大全(2). 北京: 中国建筑工业出版社, 1991. 2. 12~2. 14
- 6 孙训芳, 方孝淑, 关来泰. 材料力学(下册). 北京: 人民教育出版社, 1980. 65~71