



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 112446071 A

(43) 申请公布日 2021. 03. 05

(21) 申请号 201910832556.X

(22) 申请日 2019.09.04

(71) 申请人 中国农业大学

地址 100094 北京市海淀区圆明园西路2号

(72) 发明人 傅向荣 梁宗敏 刘玲

(74) 专利代理机构 北京清亦华知识产权代理事

务所(普通合伙) 11201

代理人 王艳斌

(51) Int. Cl.

G06F 30/13 (2020.01)

G06F 30/23 (2020.01)

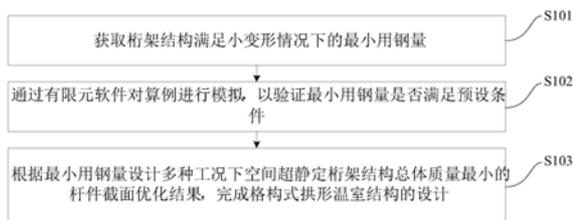
权利要求书2页 说明书9页 附图2页

(54) 发明名称

格构式拱形刚架优化设计方法及装置

(57) 摘要

本发明公开了一种格构式拱形刚架优化设计方法及装置,其中,方法包括以下步骤:获取桁架结构满足小变形情况下的最小用钢量;通过有限元软件对算例进行模拟,以验证最小用钢量是否满足预设条件;根据最小用钢量设计多种工况下空间超静定桁架结构总体质量最小的杆件截面优化结果,完成格构式拱形温室结构的设计。该方法采用刚度优化得到桁架结构的最小重量,并对截面尺寸进行优化以达到桁架结构优化的目的,从而可以在满足强度要求下,得到桁架的最优尺寸,并可以充分利用材料的性能,令材料强度得到充分发挥,并且对类似的工程结构设计会有一定的参考意义和应用价值。



1. 一种格构式拱形刚架优化设计方法,其特征在于,包括以下步骤:

获取桁架结构满足小变形情况下的最小用钢量;

通过有限元软件对算例进行模拟,以验证所述最小用钢量是否满足预设条件;以及

根据所述最小用钢量设计多种工况下空间超静定桁架结构总体质量最小的杆件截面优化结果,完成格构式拱形温室结构的设计。

2. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于,所述根据所述最小用钢量设计多种工况下空间超静定桁架结构总体质量最小的杆件截面优化结果,包括:

使目标点的最小位移为优化目标,结构总质量为固定值为优化约束条件,则在力法基本体系中,在所述目标点加一 Δ 方向的单位荷载 $F_q=1$,各杆轴力为 \bar{N}_{iq} ,则:

$$\begin{aligned}\Delta(\beta) &= \sum_f \frac{N_{ip}(\beta) \bar{N}_{iq} l_i}{EA} + \sum_x \frac{\bar{N}_{ip}(\beta) \bar{N}_{iq} l_i}{EA} \beta \\ &= \sum_f \left(\frac{\bar{N}_{i1} \bar{N}_{iq} l_i}{EA} X_1(\beta) + \frac{\bar{N}_{i2} \bar{N}_{iq} l_i}{EA} X_2(\beta) + \frac{\bar{N}_{i3} \bar{N}_{iq} l_i}{EA} X_3(\beta) + \frac{\tilde{N}_{ip} \bar{N}_{iq} l_i}{EA} \right), \\ &+ \beta \sum_x \left(\frac{\bar{N}_{i1} \bar{N}_{iq} l_i}{EA} X_1(\beta) + \frac{\bar{N}_{i2} \bar{N}_{iq} l_i}{EA} X_2(\beta) + \frac{\bar{N}_{i3} \bar{N}_{iq} l_i}{EA} X_3(\beta) + \frac{\tilde{N}_{ip} \bar{N}_{iq} l_i}{EA} \right) \\ &= \delta_{1q} X_1(\beta) + \delta_{2q} X_2(\beta) + \delta_{3q} X_3(\beta) + \delta_{pq}\end{aligned}$$

其中, β 为腹杆与弦杆面积比, f 为腹杆, l_i 为第*i*根杆的长度, EA 为抗拉压刚度, x 为弦杆, X_1 、 X_2 、 X_3 为多余未知力, \bar{N}_{i1} 为, \bar{N}_{i2} 为, \bar{N}_{i3} 为不同单位未知力下第*i*根杆的轴力, δ_{1q} 为, δ_{2q} 为, δ_{3q} 为在 F_q 作用下 X_1 、 X_2 、 X_3 方向的位移。

3. 根据权利要求2所述的方法,其特征在于,所述根据所述最小用钢量设计多种工况下空间超静定桁架结构总体质量最小的杆件截面优化结果,进一步包括:

通过变分原理进行超静定结构刚度优化格式,其中,第一计算公式为:

$$\frac{\partial \Delta(\beta)}{\partial \beta} = \left(\frac{\partial \Pi(\beta)}{\partial \beta} \cdot f_D(\beta) - \Pi(\beta) \frac{\partial f_D(\beta)}{\partial \beta} \right) / f_D^2(\beta) = 0,$$

其中, $\Pi(\beta)$ 为单位荷载作用在力法基本体系所对应静定结构的虚功, $f_D(\beta)$ 为多余约束力。

4. 根据权利要求3所述的方法,其特征在于,所述根据所述最小用钢量设计多种工况下空间超静定桁架结构总体质量最小的杆件截面优化结果,进一步包括:

根据反对称荷载进行水平刚度优化,其中,第二计算公式为:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \Pi(\beta)}{\partial \beta} \cdot f_D(\beta) - \Pi(\beta) \frac{\partial f_D(\beta)}{\partial \beta} \\ = \delta_{11,x} \cdot S_2 \cdot \beta^2 + 2 \cdot S_2 \cdot \delta_{11,f} \cdot \beta + [S_1 \cdot \delta_{11,f} - \delta_{11,x} \cdot S_3], \\ = a\beta^2 + b\beta + c\end{aligned}$$

其中, $\delta_{11,x}$ 为弦杆变形引起的位移分量, $\delta_{11,f}$ 为腹杆变形引起的位移分量, $a = \delta_{11,x} \cdot S_2$, $b = 2 \cdot S_2 \cdot \delta_{11,f}$, $c = [S_1 \cdot \delta_{11,f} - \delta_{11,x} \cdot S_3]$ 。

5. 一种格构式拱形刚架优化设计装置,其特征在于,包括:

获取模块,用于获取桁架结构满足小变形情况下的最小用钢量;

模拟模块,用于通过有限元软件对算例进行模拟,以验证所述最小用钢量是否满足预设条件;以及

设计模块,用于根据所述最小用钢量设计多种工况下空间超静定桁架结构总体质量最小的杆件截面优化结果,完成格构式拱形温室结构的设计。

6. 根据权利要求6所述的装置,其特征在于,所述设计模块进一步不用于使目标点的最小位移为优化目标,结构总质量为固定值为优化约束条件,则在力法基本体系中,在所述目标点加一 Δ 方向的单位荷载 $F_q=1$,各杆轴力为 \bar{N}_{iq} ,则:

$$\begin{aligned}\Delta(\beta) &= \sum_f \frac{N_{ip}(\beta) \bar{N}_{iq} l_i}{EA} + \sum_x \frac{\bar{N}_{ip}(\beta) \bar{N}_{iq} l_i}{EA} \beta \\ &= \sum_f \left(\frac{\bar{N}_{i1} \bar{N}_{iq} l_i}{EA} X_1(\beta) + \frac{\bar{N}_{i2} \bar{N}_{iq} l_i}{EA} X_2(\beta) + \frac{\bar{N}_{i3} \bar{N}_{iq} l_i}{EA} X_3(\beta) + \frac{\tilde{N}_{ip} \bar{N}_{iq} l_i}{EA} \right), \\ &+ \beta \sum_x \left(\frac{\bar{N}_{i1} \bar{N}_{iq} l_i}{EA} X_1(\beta) + \frac{\bar{N}_{i2} \bar{N}_{iq} l_i}{EA} X_2(\beta) + \frac{\bar{N}_{i3} \bar{N}_{iq} l_i}{EA} X_3(\beta) + \frac{\tilde{N}_{ip} \bar{N}_{iq} l_i}{EA} \right) \\ &= \delta_{1q} X_1(\beta) + \delta_{2q} X_2(\beta) + \delta_{3q} X_3(\beta) + \delta_{pq}\end{aligned}$$

其中, β 为腹杆与弦杆面积比, f 为腹杆, l_i 为第*i*根杆的长度, EA 为抗拉压刚度, x 为弦杆, X_1 、 X_2 、 X_3 为多余未知力, \bar{N}_{i1} 为, \bar{N}_{i2} 为, \bar{N}_{i3} 为不同单位未知力下第*i*根杆的轴力, δ_{1q} 为, δ_{2q} 为, δ_{3q} 为在 F_q 作用下 X_1 、 X_2 、 X_3 方向的位移。

7. 根据权利要求6所述的装置,其特征在于,所述设计模块进一步用于通过变分原理进行超静定结构刚度优化格式,其中,第一计算公式为:

$$\frac{\partial \Delta(\beta)}{\partial \beta} = \left(\frac{\partial \Pi(\beta)}{\partial \beta} \cdot f_D(\beta) - \Pi(\beta) \frac{\partial f_D(\beta)}{\partial \beta} \right) / f_D^2(\beta) = 0,$$

其中, $\Pi(\beta)$ 为单位荷载作用在力法基本体系所对应静定结构的虚功, $f_D(\beta)$ 为多余约束力。

8. 根据权利要求7所述的装置,其特征在于,所述设计模块进一步用于根据反对称荷载进行水平刚度优化,其中,第二计算公式为:

$$\begin{aligned}& \frac{\partial \Pi(\beta)}{\partial \beta} \cdot f_D(\beta) - \Pi(\beta) \frac{\partial f_D(\beta)}{\partial \beta} \\ &= \delta_{11,x} \cdot S_2 \cdot \beta^2 + 2 \cdot S_2 \cdot \delta_{11,f} \cdot \beta + [S_1 \cdot \delta_{11,f} - \delta_{11,x} \cdot S_3], \\ &= a\beta^2 + b\beta + c\end{aligned}$$

其中, $\delta_{11,x}$ 为弦杆变形引起的位移分量, $\delta_{11,f}$ 为腹杆变形引起的位移分量, $a = \delta_{11,x} \cdot S_2$, $b = 2 \cdot S_2 \cdot \delta_{11,f}$, $c = [S_1 \cdot \delta_{11,f} - \delta_{11,x} \cdot S_3]$ 。

格构式拱形刚架优化设计方法及装置

技术领域

[0001] 本发明涉及桁架结构优化技术领域,特别涉及一种格构式拱形刚架优化设计方法。

背景技术

[0002] 格构式拱形桁架结构广泛地应用于连栋温室结构的建造中。温室结构主要承受风、雪、地震等外荷载作用容易产生较大的变形。不合理的结构布置和截面设计会增加桁架的变形,同时会浪费更多的材料,不利于温室结构建造的经济性目的。

发明内容

[0003] 本发明旨在至少在一定程度上解决相关技术中的技术问题之一。

[0004] 为此,本发明的一个目的在于提出一种格构式拱形刚架优化设计方法,该方法可以在满足强度要求下,得到桁架的最优尺寸,并可以充分利用材料的性能,令材料强度得到充分发挥,并且对类似的工程结构设计会有一些的参考意义和应用价值。

[0005] 本发明的另一个目的在于提出一种格构式拱形刚架优化设计装置。

[0006] 为达到上述目的,本发明一方面实施例提出了一种格构式拱形刚架优化设计方法,包括以下步骤:获取桁架结构满足小变形情况下的最小用钢量;通过有限元软件对算例进行模拟,以验证所述最小用钢量是否满足预设条件;根据所述最小用钢量设计多种工况下空间超静定桁架结构总体质量最小的杆件截面优化结果,完成格构式拱形温室结构的设计。

[0007] 本发明实施例的格构式拱形刚架优化设计方法,针对格构式拱形温室结构,从理论上推导出了桁架结构满足小变形情况下的最小用钢量,并用有限元软件对算例进行模拟,从而验证了计算的正确性,并可以推广到多种工况下空间超静定桁架结构总体质量最小的杆件截面优化设计,从而可以在满足强度要求下,得到桁架的最优尺寸,并可以充分利用材料的性能,令材料强度得到充分发挥,并且对类似的工程结构设计会有一些的参考意义和应用价值。

[0008] 另外,根据本发明上述实施例的格构式拱形刚架优化设计方法还可以具有以下附加的技术特征:

[0009] 进一步地,在本发明的一个实施例中,所述根据所述最小用钢量设计多种工况下空间超静定桁架结构总体质量最小的杆件截面优化结果,包括:使目标点的最小位移为优化目标,结构总质量为固定值为优化约束条件,则在力法基本体系中,在所述目标点加一 Δ 方向的单位荷载 $F_q=1$,各杆轴力为 \bar{N}_{iq} ,则:

$$\begin{aligned}
\Delta(\beta) &= \sum_f \frac{N_{ip}(\beta) \bar{N}_{iq} l_i}{EA} + \sum_x \frac{\bar{N}_{ip}(\beta) \bar{N}_{iq} l_i}{EA} \beta \\
[0010] \quad &= \sum_f \left(\frac{\bar{N}_{i1} \bar{N}_{iq} l_i}{EA} X_1(\beta) + \frac{\bar{N}_{i2} \bar{N}_{iq} l_i}{EA} X_2(\beta) + \frac{\bar{N}_{i3} \bar{N}_{iq} l_i}{EA} X_3(\beta) + \frac{\tilde{N}_{ip} \bar{N}_{iq} l_i}{EA} \right), \\
&+ \beta \sum_x \left(\frac{\bar{N}_{i1} \bar{N}_{iq} l_i}{EA} X_1(\beta) + \frac{\bar{N}_{i2} \bar{N}_{iq} l_i}{EA} X_2(\beta) + \frac{\bar{N}_{i3} \bar{N}_{iq} l_i}{EA} X_3(\beta) + \frac{\tilde{N}_{ip} \bar{N}_{iq} l_i}{EA} \right) \\
&= \delta_{1q} X_1(\beta) + \delta_{2q} X_2(\beta) + \delta_{3q} X_3(\beta) + \delta_{pq}
\end{aligned}$$

[0011] 其中, β 为腹杆与弦杆面积比, f 为腹杆, l_i 为第 i 根杆的长度, EA 为抗拉压刚度, x 为弦杆, X_1 、 X_2 、 X_3 为多余未知力, \bar{N}_{i1} 为, \bar{N}_{i2} 为, \bar{N}_{i3} 为不同单位未知力下第 i 根杆的轴力, δ_{1q} 为, δ_{2q} 为, δ_{3q} 为在 F_q 作用下 X_1 、 X_2 、 X_3 方向的位移。

[0012] 进一步地, 在本发明的一个实施例中, 所述根据所述最小用钢量设计多种工况下空间超静定桁架结构总体质量最小的杆件截面优化结果, 进一步包括: 通过变分原理进行超静定结构刚度优化格式, 其中, 第一计算公式为:

$$[0013] \quad \frac{\partial \Delta(\beta)}{\partial \beta} = \left(\frac{\partial \Pi(\beta)}{\partial \beta} \cdot f_D(\beta) - \Pi(\beta) \frac{\partial f_D(\beta)}{\partial \beta} \right) / f_D^2(\beta) = 0,$$

[0014] 其中, $\Pi(\beta)$ 为单位荷载作用在力法基本体系所对应静定结构的虚功, $f_D(\beta)$ 为多余约束力。

[0015] 进一步地, 在本发明的一个实施例中, 所述根据所述最小用钢量设计多种工况下空间超静定桁架结构总体质量最小的杆件截面优化结果, 进一步包括:

[0016] 根据反对称荷载进行水平刚度优化, 其中, 第二计算公式为:

$$\begin{aligned}
[0017] \quad & \frac{\partial \Pi(\beta)}{\partial \beta} \cdot f_D(\beta) - \Pi(\beta) \frac{\partial f_D(\beta)}{\partial \beta} \\
&= \delta_{11,x} \cdot S_2 \cdot \beta^2 + 2 \cdot S_2 \cdot \delta_{11,f} \cdot \beta + [S_1 \cdot \delta_{11,f} - \delta_{11,x} \cdot S_3], \\
&= a\beta^2 + b\beta + c
\end{aligned}$$

[0018] 其中, $\delta_{11,x}$ 为弦杆变形引起的位移分量, $\delta_{11,f}$ 为腹杆变形引起的位移分量, $a = \delta_{11,x} \cdot S_2$, $b = 2 \cdot S_2 \cdot \delta_{11,f}$, $c = [S_1 \cdot \delta_{11,f} - \delta_{11,x} \cdot S_3]$ 。

[0019] 为达到上述目的, 本发明另一方面实施例提出了一种格构式拱形刚架优化设计装置, 包括: 获取模块, 用于获取桁架结构满足小变形情况下的最小用钢量; 模拟模块, 用于通过有限元软件对算例进行模拟, 以验证所述最小用钢量是否满足预设条件; 设计模块, 用于根据所述最小用钢量设计多种工况下空间超静定桁架结构总体质量最小的杆件截面优化结果, 完成格构式拱形温室结构的设计。

[0020] 本发明实施例的格构式拱形刚架优化设计装置, 针对格构式拱形温室结构, 从理论上推导出了桁架结构满足小变形情况下的最小用钢量, 并用有限元软件对算例进行模拟, 从而验证了计算的正确性, 并可以推广到多种工况下空间超静定桁架结构总体质量最小的杆件截面优化设计, 从而可以在满足强度要求下, 得到桁架的最优尺寸, 并可以充分利用材料的性能, 令材料强度得到充分发挥, 并且对类似的工程结构设计会有一些的参考意

义和应用价值。

[0021] 另外,根据本发明上述实施例的格构式拱形刚架优化设计装置还可以具有以下附加的技术特征:

[0022] 进一步地,在本发明的一个实施例中,所述设计模块进一步不用于使目标点的最小位移为优化目标,结构总质量为固定值为优化约束条件,则在力法基本体系中,在所述目标点加一 Δ 方向的单位荷载 $F_q=1$,各杆轴力为 \bar{N}_{iq} ,则:

$$\begin{aligned}
 \Delta(\beta) &= \sum_f \frac{N_{ip}(\beta) \bar{N}_{iq} l_i}{EA} + \sum_x \frac{\bar{N}_{ip}(\beta) \bar{N}_{iq} l_i}{EA} \beta \\
 [0023] \quad &= \sum_f \left(\frac{\bar{N}_{i1} \bar{N}_{iq} l_i}{EA} X_1(\beta) + \frac{\bar{N}_{i2} \bar{N}_{iq} l_i}{EA} X_2(\beta) + \frac{\bar{N}_{i3} \bar{N}_{iq} l_i}{EA} X_3(\beta) + \frac{\tilde{N}_{ip} \bar{N}_{iq} l_i}{EA} \right), \\
 &+ \beta \sum_x \left(\frac{\bar{N}_{i1} \bar{N}_{iq} l_i}{EA} X_1(\beta) + \frac{\bar{N}_{i2} \bar{N}_{iq} l_i}{EA} X_2(\beta) + \frac{\bar{N}_{i3} \bar{N}_{iq} l_i}{EA} X_3(\beta) + \frac{\tilde{N}_{ip} \bar{N}_{iq} l_i}{EA} \right) \\
 &= \delta_{1q} X_1(\beta) + \delta_{2q} X_2(\beta) + \delta_{3q} X_3(\beta) + \delta_{pq}
 \end{aligned}$$

[0024] 其中, β 为腹杆与弦杆面积比, f 为腹杆, l_i 为第*i*根杆的长度, EA 为抗拉压刚度, x 为弦杆, X_1 、 X_2 、 X_3 为多余未知力, \bar{N}_{i1} 为, \bar{N}_{i2} 为, \bar{N}_{i3} 为不同单位未知力下第*i*根杆的轴力, δ_{1q} 为, δ_{2q} 为, δ_{3q} 为在 F_q 作用下 X_1 、 X_2 、 X_3 方向的位移。

[0025] 进一步地,在本发明的一个实施例中,所述设计模块进一步用于通过变分原理进行超静定结构刚度优化格式,其中,第一计算公式为:

$$[0026] \quad \frac{\partial \Delta(\beta)}{\partial \beta} = \left(\frac{\partial \Pi(\beta)}{\partial \beta} \cdot f_D(\beta) - \Pi(\beta) \frac{\partial f_D(\beta)}{\partial \beta} \right) / f_D^2(\beta) = 0,$$

[0027] 其中, $\Pi(\beta)$ 为单位荷载作用在力法基本体系所对应静定结构的虚功, $f_D(\beta)$ 为多余约束力。

[0028] 进一步地,在本发明的一个实施例中,所述设计模块进一步用于根据反对称荷载进行水平刚度优化,其中,第二计算公式为:

$$\begin{aligned}
 [0029] \quad & \frac{\partial \Pi(\beta)}{\partial \beta} \cdot f_D(\beta) - \Pi(\beta) \frac{\partial f_D(\beta)}{\partial \beta} \\
 &= \delta_{11,x} \cdot S_2 \cdot \beta^2 + 2 \cdot S_2 \cdot \delta_{11,f} \cdot \beta + [S_1 \cdot \delta_{11,f} - \delta_{11,x} \cdot S_3], \\
 &= a\beta^2 + b\beta + c
 \end{aligned}$$

[0030] 其中, $\delta_{11,x}$ 为弦杆变形引起的位移分量, $\delta_{11,f}$ 为腹杆变形引起的位移分量, $a = \delta_{11,x} \cdot S_2$, $b = 2 \cdot S_2 \cdot \delta_{11,f}$, $c = [S_1 \cdot \delta_{11,f} - \delta_{11,x} \cdot S_3]$ 。

[0031] 本发明附加的方面和优点将在下面的描述中部分给出,部分将从下面的描述中变得明显,或通过本发明的实践了解到。

附图说明

[0032] 本发明上述的和/或附加的方面和优点从下面结合附图对实施例的描述中将变得明显和容易理解,其中:

- [0033] 图1为根据本发明实施例的格构式拱形刚架优化设计方法的流程图；
 [0034] 图2为根据本发明实施例的格构式拱形刚架优化设计方法的原理示意图；
 [0035] 图3为根据本发明实施例的反对称半结构示意图；
 [0036] 图4为根据本发明实施例的格构式拱形刚架优化设计装置的结构示意图。

具体实施方式

[0037] 下面详细描述本发明的实施例，所述实施例的示例在附图中示出，其中自始至终相同或类似的标号表示相同或类似的元件或具有相同或类似功能的元件。下面通过参考附图描述的实施例是示例性的，旨在用于解释本发明，而不能理解为对本发明的限制。

[0038] 下面参照附图描述根据本发明实施例提出的格构式拱形刚架优化设计方法及装置，首先将参照附图描述根据本发明实施例提出的格构式拱形刚架优化设计方法。

[0039] 图1是本发明一个实施例的格构式拱形刚架优化设计方法的流程图。

[0040] 如图1所示，该格构式拱形刚架优化设计方法包括以下步骤：

[0041] 在步骤S101中，获取桁架结构满足小变形情况下的最小用钢量。

[0042] 可以理解的是，本发明实施例可以从理论上推导出了桁架结构满足小变形情况下的最小用钢量。其中，本领域技术人员可以根据实际情况选择具体的理论进行推导，在此不做具体限定。

[0043] 在步骤S102中，通过有限元软件对算例进行模拟，以验证最小用钢量是否满足预设条件。

[0044] 可以理解的是，本发明实施例用有限元软件对算例进行模拟，从而验证了计算的正确性。其中，本领域技术人员可以根据实际设置预设条件，在此不做具体限定。

[0045] 在步骤S103中，根据最小用钢量设计多种工况下空间超静定桁架结构总体质量最小的杆件截面优化结果，完成格构式拱形温室结构的设计。

[0046] 可以理解的是，本发明实施例可以推广到多种工况下空间超静定桁架结构总体质量最小的杆件截面优化设计。

[0047] 下面将结合图2对格构式拱形刚架优化设计方法进行进一步说明。

[0048] 一、图2中假设腹杆与弦杆面积比 β 为：

$$[0049] \quad \frac{A_f}{A_x} = \frac{A_{腹}}{A_{弦}} = \beta \quad (1)$$

$$[0050] \quad \text{令 } A_f = A_{腹} = A \quad (2)$$

$$[0051] \quad \text{则 } A_x = A_{弦} = \frac{A}{\beta} \quad (3)$$

[0052] 二、力法基本体系

[0053] 去掉右侧支座，代之以未知支座反力：

$$[0054] \quad X_1 = F_{Y_1}, \quad X_2 = F_{Y_2}, \quad X_3 = F_{X_2} \quad (4)$$

[0055] 分别作用单位荷载，

$$[0056] \quad X_1 = 1, X_2 = 1, X_3 = 1 \quad (5)$$

[0057] 则各杆轴力为：

[0058] $\bar{N}_{i1}, \bar{N}_{i2}, \bar{N}_{i3}, \tilde{N}_{ip}$ (荷载) (6)

[0059] 分别可计算得|:

[0060] (7)

$$[0061] \delta_{jp} = \sum_f \frac{\bar{N}_{ij} \tilde{N}_{ip} l_i}{EA} + \sum_x \frac{\bar{N}_{ij} \tilde{N}_{ip} l_i}{EA} \beta = \delta_{jp,f} + \delta_{jp,x} \cdot \beta \quad (8)$$

[0062] 则力法基本方程可写为

$$[0063] (\delta_{11,f} + \delta_{11,x} \cdot \beta) \cdot X_1 + (\delta_{12,f} + \delta_{12,x} \cdot \beta) \cdot X_2 + (\delta_{13,f} + \delta_{13,x} \cdot \beta) \cdot X_3 + (\delta_{1p,f} + \delta_{1p,x} \cdot \beta) = 0$$

$$[0064] (\delta_{21,f} + \delta_{21,x} \cdot \beta) \cdot X_1 + (\delta_{22,f} + \delta_{22,x} \cdot \beta) \cdot X_2 + (\delta_{23,f} + \delta_{23,x} \cdot \beta) \cdot X_3 + (\delta_{2p,f} + \delta_{2p,x} \cdot \beta) = 0$$

$$[0065] (\delta_{31,f} + \delta_{31,x} \cdot \beta) \cdot X_1 + (\delta_{32,f} + \delta_{32,x} \cdot \beta) \cdot X_2 + (\delta_{33,f} + \delta_{33,x} \cdot \beta) \cdot X_3 + (\delta_{3p,f} + \delta_{3p,x} \cdot \beta) = 0$$

[0066] (9)

[0067] 解公式9可得:

$$[0068] X_1 = \frac{|D_1|}{|D|} = \frac{f_{p_1}(\beta)}{f_D(\beta)}, X_2 = \frac{|D_2|}{|D|} = \frac{f_{p_2}(\beta)}{f_D(\beta)}, X_3 = \frac{|D_3|}{|D|} = \frac{f_{p_3}(\beta)}{f_D(\beta)} \quad (10)$$

[0069] 其中,

$$[0070] |D| = \begin{vmatrix} \delta_{11,f} + \delta_{11,x} \cdot \beta & \delta_{12,f} + \delta_{12,x} \cdot \beta & \delta_{13,f} + \delta_{13,x} \cdot \beta \\ \delta_{21,f} + \delta_{21,x} \cdot \beta & \delta_{22,f} + \delta_{22,x} \cdot \beta & \delta_{23,f} + \delta_{23,x} \cdot \beta \\ \delta_{31,f} + \delta_{31,x} \cdot \beta & \delta_{32,f} + \delta_{32,x} \cdot \beta & \delta_{33,f} + \delta_{33,x} \cdot \beta \end{vmatrix} \quad (11)$$

$$= k_{D_0} + k_{D_1} \beta + k_{D_2} \beta^2 + k_{D_3} \beta^3 = f_D(\beta)$$

$$[0071] |D_1| = \begin{vmatrix} -(\delta_{1p,f} + \delta_{1p,x} \cdot \beta) & \delta_{12,f} + \delta_{12,x} \cdot \beta & \delta_{13,f} + \delta_{13,x} \cdot \beta \\ -(\delta_{2p,f} + \delta_{2p,x} \cdot \beta) & \delta_{22,f} + \delta_{22,x} \cdot \beta & \delta_{23,f} + \delta_{23,x} \cdot \beta \\ -(\delta_{3p,f} + \delta_{3p,x} \cdot \beta) & \delta_{32,f} + \delta_{32,x} \cdot \beta & \delta_{33,f} + \delta_{33,x} \cdot \beta \end{vmatrix}$$

$$= k_{P_{10}} + k_{P_{11}} \beta + k_{P_{12}} \beta^2 + k_{P_{13}} \beta^3 = f_{P_1}(\beta)$$

$$|D_2| = k_{P_{20}} + k_{P_{21}} \beta + k_{P_{22}} \beta^2 + k_{P_{23}} \beta^3 = f_{P_2}(\beta) \quad (12)$$

$$|D_3| = k_{P_{30}} + k_{P_{31}} \beta + k_{P_{32}} \beta^2 + k_{P_{33}} \beta^3 = f_{P_3}(\beta)$$

[0072] 则各杆轴力为:

$$[0073] N_{ip}(\beta) = \bar{N}_{i1} X_1(\beta) + \bar{N}_{i2} X_2(\beta) + \bar{N}_{i3} X_3(\beta) + \tilde{N}_{ip} \quad (13)$$

[0074] 三、优化目标的引入(刚度)

[0075] 使某点B位移 Δ 最小为优化目标,结构总质量为一固定值m为优化约束条件。

[0076] 则在力法基本体系中,在B点加一 Δ 方向的单位荷载 $F_q=1$,这时各杆轴力为 \bar{N}_{iq} ,则有:

$$\begin{aligned}
\Delta(\beta) &= \sum_f \frac{N_{ip}(\beta) \bar{N}_{iq} l_i}{EA} + \sum_x \frac{\bar{N}_{ip}(\beta) \bar{N}_{iq} l_i}{EA} \beta \\
&= \sum_f \left(\frac{\bar{N}_{i1} \bar{N}_{iq} l_i}{EA} X_1(\beta) + \frac{\bar{N}_{i2} \bar{N}_{iq} l_i}{EA} X_2(\beta) + \frac{\bar{N}_{i3} \bar{N}_{iq} l_i}{EA} X_3(\beta) + \frac{\tilde{N}_{ip} \bar{N}_{iq} l_i}{EA} \right) \\
&+ \beta \sum_x \left(\frac{\bar{N}_{i1} \bar{N}_{iq} l_i}{EA} X_1(\beta) + \frac{\bar{N}_{i2} \bar{N}_{iq} l_i}{EA} X_2(\beta) + \frac{\bar{N}_{i3} \bar{N}_{iq} l_i}{EA} X_3(\beta) + \frac{\tilde{N}_{ip} \bar{N}_{iq} l_i}{EA} \right) \\
&= \delta_{1q} X_1(\beta) + \delta_{2q} X_2(\beta) + \delta_{3q} X_3(\beta) + \delta_{pq}
\end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned}
\delta_{iq} &= \delta_{iq,f} + \delta_{iq,x} \cdot \beta \\
\delta_{pq} &= \delta_{pq,f} + \delta_{pq,x} \cdot \beta \quad i=1,2,3
\end{aligned} \quad (15)$$

四、基于变分原理的超静定结构刚度优化格式

使公式14对应的 $\Delta(\beta)$ 取驻值,由变分原理,令

$$\frac{\partial \Delta(\beta)}{\partial \beta} = 0 \quad (16)$$

若使公式16成立,可设

$$\Pi(\beta) = \Delta(\beta) \cdot |D| = \Delta(\beta) \cdot f_D(\beta) \quad (17)$$

有

$$\Pi(\beta) = \sum_{i=1}^3 f_{p_i}(\beta) \cdot (\delta_{iq,f} + \delta_{iq,x} \cdot \beta) + f_D(\beta) \cdot (\delta_{pq,f} + \delta_{pq,x} \cdot \beta) \quad (18)$$

则

$$\frac{\partial \Pi(\beta)}{\partial \beta} = \left(\frac{\partial \Pi(\beta)}{\partial \beta} \cdot f_D(\beta) - \Pi(\beta) \frac{\partial f_D(\beta)}{\partial \beta} \right) / f_D^2(\beta) = 0 \quad (19)$$

其中,应有:

$$\frac{\partial \Pi(\beta)}{\partial \beta} \cdot f_D(\beta) - \Pi(\beta) \frac{\partial f_D(\beta)}{\partial \beta} = 0 \quad (20)$$

这是关于 β 的6次多项式求根式。

考虑结构与荷载的对称(反对称)性,可化为一个二次超静定(四次求根式,对称)和静定结构(反对称)的问题讨论。

五、如图3所示,反对称荷载的水平刚度优化

则在公式4至公式20中,退化为一个一次超静定问题。

则在公式20中,

$$f_D(\beta) = \delta_{11,f} + \delta_{11,x} \cdot \beta \quad (21)$$

$$\begin{aligned}
\Pi(\beta) &= -(\delta_{pq,f} + \delta_{1p,x} \cdot \beta) \cdot (\delta_{1q,f} + \delta_{1q,x} \cdot \beta) \\
&+ (\delta_{11,f} + \delta_{11,x} \cdot \beta) \cdot (\delta_{pq,f} + \delta_{pq,x} \cdot \beta)
\end{aligned} \quad (22)$$

[0097]
$$\frac{\partial f_D(\beta)}{\partial \beta} = \delta_{11,x} \quad (23)$$

[0098]
$$\begin{aligned} \frac{\partial \Pi(\beta)}{\partial \beta} = & -(\delta_{1p,f} \cdot \delta_{1q,x} + \delta_{1p,x} \cdot \delta_{1q,f} + 2\delta_{1p,x} \cdot \delta_{1q,x} \cdot \beta) \\ & + (\delta_{11,f} \cdot \delta_{pq,x} + \delta_{11,x} \cdot \delta_{pq,f} + 2\delta_{11,x} \cdot \delta_{pq,x} \cdot \beta) \end{aligned} \quad (24)$$

[0099] 将公式21至公式24代入公式20可得：

[0100]
$$\begin{aligned} & \frac{\partial \Pi(\beta)}{\partial \beta} \cdot f_D(\beta) - \Pi(\beta) \frac{f_D(\beta)}{\partial \beta} \\ = & [(\delta_{11,f} \cdot \delta_{pq,x} + \delta_{11,x} \cdot \delta_{pq,f} - \delta_{1p,f} \cdot \delta_{1q,x} - \delta_{1p,x} \cdot \delta_{1q,f}) \\ & + 2(\delta_{11,x} \cdot \delta_{pq,x} - \delta_{1p,x} \cdot \delta_{1q,x}) \cdot \beta] \cdot (\delta_{11,f} + \delta_{11,x} \cdot \beta) \\ & - \delta_{11,x} \cdot [(\delta_{11,f} \cdot \delta_{pq,f} - \delta_{1p,f} \cdot \delta_{1q,f}) \\ & + (\delta_{11,f} \cdot \delta_{pq,x} + \delta_{11,x} \cdot \delta_{pq,f} - \delta_{pq,f} \cdot \delta_{1q,x} - \delta_{1p,x} \cdot \delta_{1q,f}) \cdot \beta \\ & + (\delta_{11,x} \cdot \delta_{pq,x} - \delta_{1p,x} \cdot \delta_{1q,x}) \cdot \beta^2] \end{aligned} \quad (25)$$

[0101] 令

[0102]
$$\begin{aligned} S_1 &= \delta_{11,f} \cdot \delta_{pq,x} + \delta_{11,x} \cdot \delta_{pq,f} - \delta_{1p,f} \cdot \delta_{1q,x} - \delta_{1p,x} \cdot \delta_{1q,f} \\ S_2 &= \delta_{11,x} \cdot \delta_{pq,x} - \delta_{1p,x} \cdot \delta_{1q,x} \\ S_3 &= \delta_{11,f} \cdot \delta_{pq,f} - \delta_{1p,f} \cdot \delta_{1q,f} \end{aligned} \quad (26)$$

[0103] 则公式25变为：

[0104]
$$\begin{aligned} & \frac{\partial \Pi(\beta)}{\partial \beta} \cdot f_D(\beta) - \Pi(\beta) \frac{f_D(\beta)}{\partial \beta} \\ = & \delta_{11,x} \cdot S_2 \cdot \beta^2 + 2 \cdot S_2 \cdot \delta_{11,f} \cdot \beta + [S_1 \cdot \delta_{11,f} - \delta_{11,x} \cdot S_3] \\ = & a\beta^2 + b\beta + c \end{aligned} \quad (27)$$

[0105] 其中，

[0106]
$$a = \delta_{11,x} \cdot S_2 \quad b = 2 \cdot S_2 \cdot \delta_{11,f} \quad c = S_1 \cdot \delta_{11,f} - \delta_{11,x} \cdot S_3 \quad (28)$$

[0107]
$$\beta = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (29)$$

[0108] 其中，

[0109]
$$\begin{aligned} b^2 - 4ac &= 4 \cdot S_2 \cdot \delta_{11,f}^2 - 4 \cdot \delta_{11,x} \cdot S_2 \cdot [S_1 \cdot \delta_{11,f} - \delta_{11,x} \cdot S_3] \\ &= 4 \cdot S_2 \cdot \{ \delta_{11,f} \cdot (\delta_{11,x} \cdot \delta_{pq,x} - \delta_{1p,x} \cdot \delta_{1q,x}) \\ & - \delta_{11,x} \cdot \delta_{11,f} \cdot [\delta_{11,f} \cdot \delta_{pq,x} + \delta_{11,x} \cdot \delta_{pq,f} - \delta_{1p,f} \cdot \delta_{1q,x} - \delta_{1p,x} \cdot \delta_{1q,f}] \\ & + \delta_{11,x}^2 \cdot [\delta_{11,f} \cdot \delta_{pq,f} - \delta_{1p,f} \cdot \delta_{1q,f}] \} \\ &= 4 \cdot S_2 \cdot \{ -\delta_{11,f}^2 \cdot \delta_{1p,x} \cdot \delta_{1q,x} + \delta_{11,x} \cdot \delta_{11,f} \cdot \delta_{1p,f} \cdot \delta_{1q,x} \\ & + \delta_{11,x} \cdot \delta_{11,f} \cdot \delta_{1p,x} \cdot \delta_{1q,f} - \delta_{11,x}^2 \cdot \delta_{1p,f} \cdot \delta_{1q,f} \} \end{aligned} \quad (30)$$

[0110] 综上，本发明实施例的方法为一种基于变分原理的(三次超静定)格构式拱形刚架

优化方法,采用刚度优化得到桁架结构的最小重量,并对截面尺寸进行优化以达到桁架结构优化的目的,从而可以得到桁架的最优尺寸,得到的尺寸不仅满足了强度要求,且充分利用了材料的性能,令材料强度得到了充分的发挥。

[0111] 根据本发明实施例提出的格构式拱形刚架优化设计方法,针对格构式拱形温室结构,从理论上推导出了桁架结构满足小变形情况下的最小用钢量,并用有限元软件对算例进行模拟,从而验证了计算的正确性,并可以推广到多种工况下空间超静定桁架结构总体质量最小的杆件截面优化设计,从而可以在满足强度要求下,得到桁架的最优尺寸,并可以充分利用材料的性能,令材料强度得到充分发挥,并且对类似的工程结构设计会有一些的参考意义和应用价值。

[0112] 其次参照附图描述根据本发明实施例提出的格构式拱形刚架优化设计装置。

[0113] 图4是本发明一个实施例的格构式拱形刚架优化设计装置的结构示意图。

[0114] 如图4所示,该格构式拱形刚架优化设计装置10包括:获取模块100、模拟模块200和设计模块300。

[0115] 其中,获取模块100用于获取桁架结构满足小变形情况下的最小用钢量。模拟模块200用于通过有限元软件对算例进行模拟,以验证最小用钢量是否满足预设条件。设计模块300用于根据最小用钢量设计多种工况下空间超静定桁架结构总体质量最小的杆件截面优化结果,完成格构式拱形温室结构的设计。本发明实施例的装置10采用刚度优化得到桁架结构的最小重量,并对截面尺寸进行优化以达到桁架结构优化的目的,从而可以在满足强度要求下,得到桁架的最优尺寸,并可以充分利用材料的性能,令材料强度得到充分发挥,并且对类似的工程结构设计会有一些的参考意义和应用价值。

[0116] 进一步地,在本发明的一个实施例中,设计模块300进一步不用于使目标点的最小位移为优化目标,结构总质量为固定值为优化约束条件,则在力法基本体系中,在目标点加一 Δ 方向的单位荷载 $F_q=1$,各杆轴力为 \bar{N}_{iq} ,则:

$$\begin{aligned}
 \Delta(\beta) &= \sum_f \frac{N_{ip}(\beta) \bar{N}_{iq} l_i}{EA} + \sum_x \frac{\bar{N}_{ip}(\beta) \bar{N}_{iq} l_i}{EA} \beta \\
 &= \sum_f \left(\frac{\bar{N}_{i1} \bar{N}_{iq} l_i}{EA} X_1(\beta) + \frac{\bar{N}_{i2} \bar{N}_{iq} l_i}{EA} X_2(\beta) + \frac{\bar{N}_{i3} \bar{N}_{iq} l_i}{EA} X_3(\beta) + \frac{\tilde{N}_{ip} \bar{N}_{iq} l_i}{EA} \right), \\
 &+ \beta \sum_x \left(\frac{\bar{N}_{i1} \bar{N}_{iq} l_i}{EA} X_1(\beta) + \frac{\bar{N}_{i2} \bar{N}_{iq} l_i}{EA} X_2(\beta) + \frac{\bar{N}_{i3} \bar{N}_{iq} l_i}{EA} X_3(\beta) + \frac{\tilde{N}_{ip} \bar{N}_{iq} l_i}{EA} \right) \\
 &= \delta_{1q} X_1(\beta) + \delta_{2q} X_2(\beta) + \delta_{3q} X_3(\beta) + \delta_{pq}
 \end{aligned}$$

[0118] 其中, β 为腹杆与弦杆面积比, f 为腹杆, l_i 为第 i 根杆的长度, EA 为抗拉压刚度, x 为弦杆, X_1 、 X_2 、 X_3 为多余未知力, \bar{N}_{i1} 为, \bar{N}_{i2} 为, \bar{N}_{i3} 为不同单位未知力下第 i 根杆的轴力, δ_{1q} 为, δ_{2q} 为, δ_{3q} 为在 F_q 作用下 X_1 、 X_2 、 X_3 方向的位移。

[0119] 进一步地,在本发明的一个实施例中,设计模块300进一步用于通过变分原理进行超静定结构刚度优化格式,其中,第一计算公式为:

$$[0120] \quad \frac{\partial \Delta(\beta)}{\partial \beta} = \left(\frac{\partial \Pi(\beta)}{\partial \beta} \cdot f_D(\beta) - \Pi(\beta) \frac{\partial f_D(\beta)}{\partial \beta} \right) / f_D^2(\beta) = 0,$$

[0121] 其中, $\Pi(\beta)$ 为单位荷载作用在力法基本体系所对应静定结构的虚功, $f_D(\beta)$ 为多余约束力。

[0122] 进一步地, 在本发明的一个实施例中, 设计模块300进一步用于根据反对称荷载进行水平刚度优化, 其中, 第二计算公式为:

$$[0123] \quad \begin{aligned} & \frac{\partial \Pi(\beta)}{\partial \beta} \cdot f_D(\beta) - \Pi(\beta) \frac{\partial f_D(\beta)}{\partial \beta} \\ &= \delta_{11,x} \cdot S_2 \cdot \beta^2 + 2 \cdot S_2 \cdot \delta_{11,f} \cdot \beta + [S_1 \cdot \delta_{11,f} - \delta_{11,x} \cdot S_3], \\ &= a\beta^2 + b\beta + c \end{aligned}$$

[0124] 其中, $\delta_{11,x}$ 为弦杆变形引起的位移分量, $\delta_{11,f}$ 为腹杆变形引起的位移分量, $a = \delta_{11,x} \cdot S_2$, $b = 2 \cdot S_2 \cdot \delta_{11,f}$, $c = [S_1 \cdot \delta_{11,f} - \delta_{11,x} \cdot S_3]$ 。

[0125] 需要说明的是, 前述对格构式拱形刚架优化设计方法实施例的解释说明也适用于该实施例的格构式拱形刚架优化设计装置, 此处不再赘述。

[0126] 根据本发明实施例提出的格构式拱形刚架优化设计装置, 针对格构式拱形温室结构, 从理论上推导出了桁架结构满足小变形情况下的最小用钢量, 并用有限元软件对算例进行模拟, 从而验证了计算的正确性, 并可以推广到多种工况下空间超静定桁架结构总体质量最小的杆件截面优化设计, 从而可以在满足强度要求下, 得到桁架的最优尺寸, 并可以充分利用材料的性能, 令材料强度得到充分发挥, 并且对类似的工程结构设计会有一些的参考意义和应用价值。

[0127] 此外, 术语“第一”、“第二”仅用于描述目的, 而不能理解为指示或暗示相对重要性或者隐含指明所指示的技术特征的数量。由此, 限定有“第一”、“第二”的特征可以明示或者隐含地包括至少一个该特征。在本发明的描述中, “多个”的含义是至少两个, 例如两个, 三个等, 除非另有明确具体的限定。

[0128] 在本说明书的描述中, 参考术语“一个实施例”、“一些实施例”、“示例”、“具体示例”、或“一些示例”等的描述意指结合该实施例或示例描述的具体特征、结构、材料或者特点包含于本发明的至少一个实施例或示例中。在本说明书中, 对上述术语的示意性表述不必针对的是相同的实施例或示例。而且, 描述的具体特征、结构、材料或者特点可以在任一个或多个实施例或示例中以合适的方式结合。此外, 在不相互矛盾的情况下, 本领域的技术人员可以将本说明书中描述的不同实施例或示例以及不同实施例或示例的特征进行结合和组合。

[0129] 尽管上面已经示出和描述了本发明的实施例, 可以理解的是, 上述实施例是示例性的, 不能理解为对本发明的限制, 本领域的普通技术人员在本发明的范围内可以对上述实施例进行变化、修改、替换和变型。

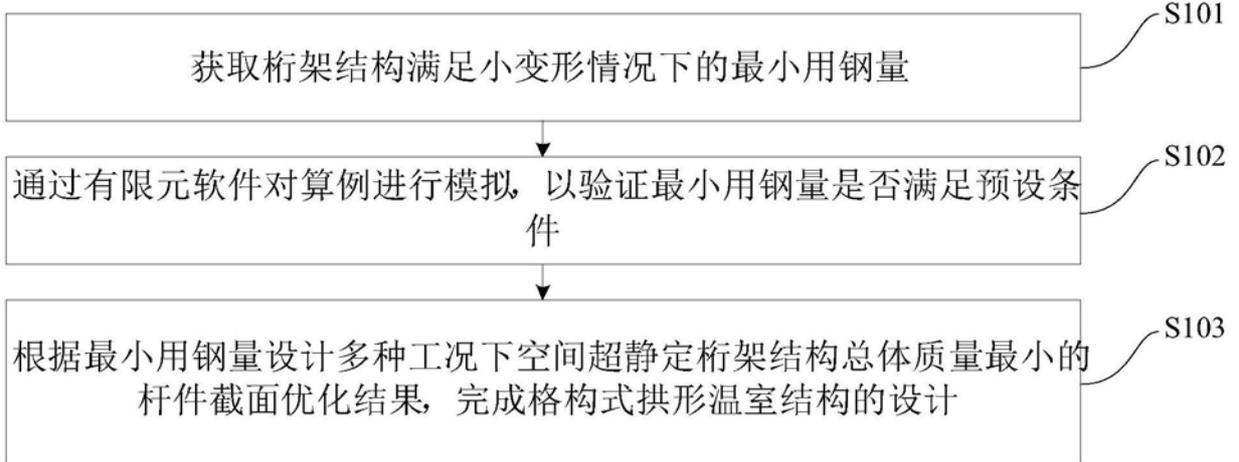


图1

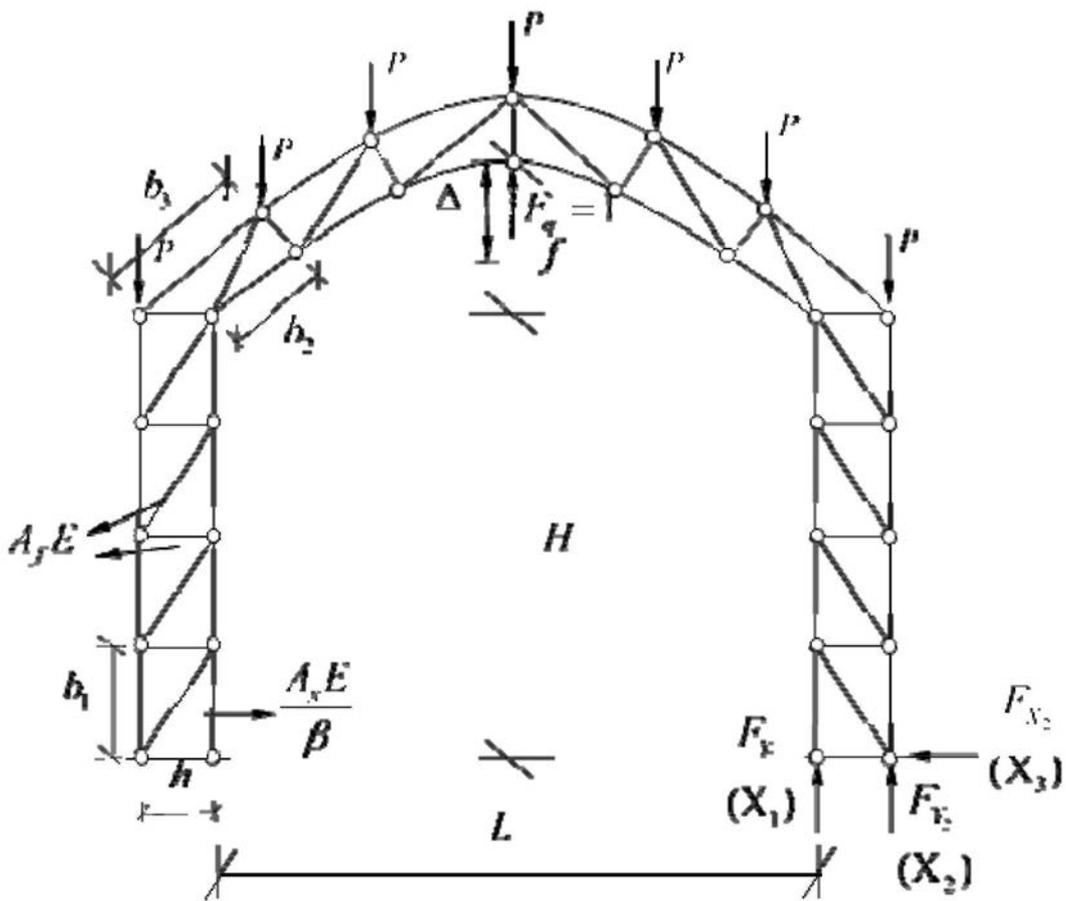


图2

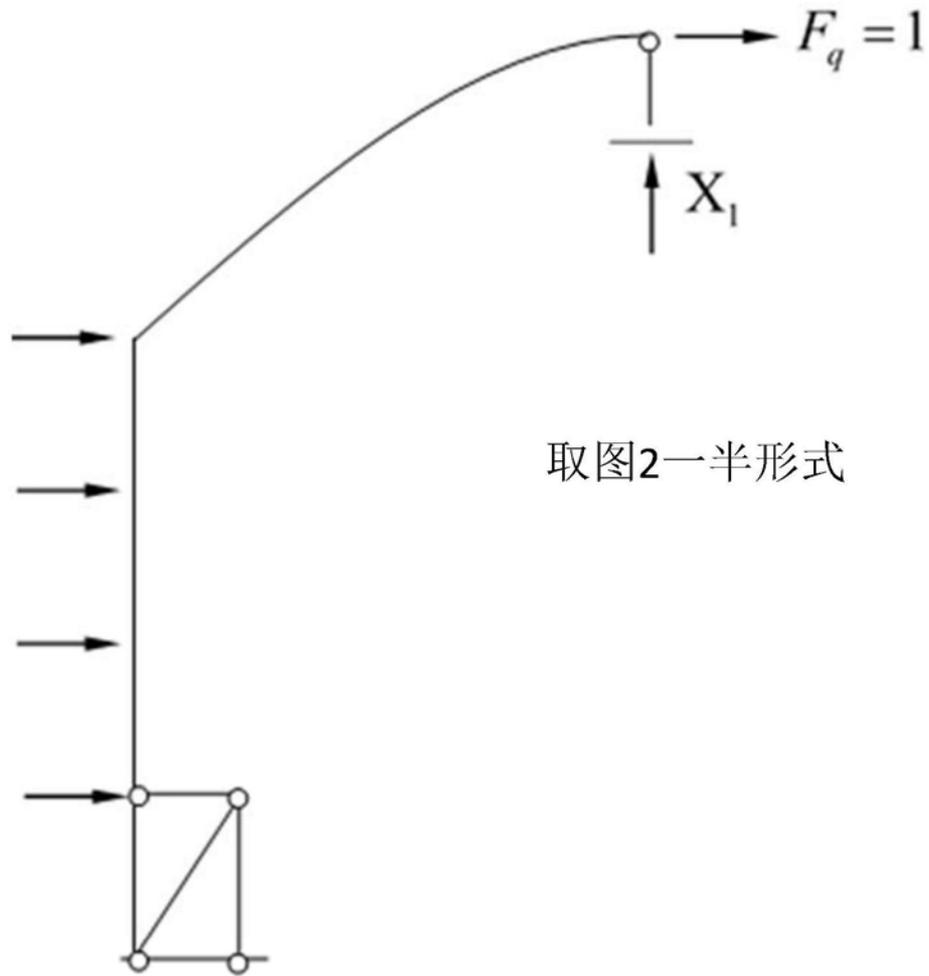


图3

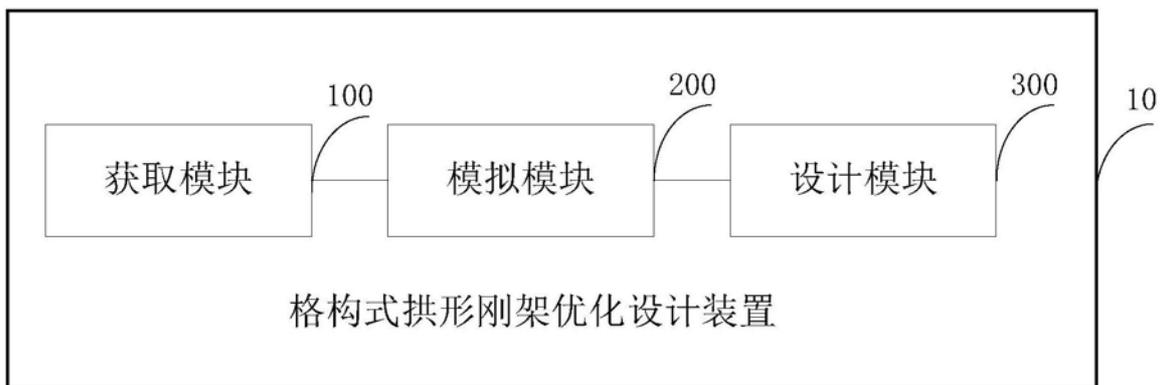


图4