

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2019 年 6 月 27 日 (27.06.2019)



(10) 国际公布号
WO 2019/120239 A1

(51) 国际专利分类号:
G06F 17/50 (2006.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2018/122264

(22) 国际申请日: 2018 年 12 月 20 日 (20.12.2018)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(30) 优先权:
201711388553.9 2017 年 12 月 21 日 (21.12.2017) CN

(71) 申请人: 大连理工大学 (**DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY**) [CN/CN]; 中国辽宁省大连市凌工路 2 号大连理工大学专利中心, Liaoning 116024 (CN)。

(72) 发明人: 罗阳军(**LUO, Yangjun**); 中国辽宁省大连市凌工路 2 号大连理工大学专利中心, Liaoning 116024 (CN)。 邢健(**XING, Jian**); 中国辽宁省大连市凌工路 2 号大连理工大学专利中心, Liaoning 116024 (CN)。 亢战(**KANG, Zhan**); 中国辽宁省大连市凌工路 2 号大连理工大学专利中心, Liaoning 116024 (CN)。 李明(**LI, Ming**); 中国辽宁省大连市凌工路 2 号大连理工大学专利中心, Liaoning 116024 (CN)。

(81) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK,

(54) **Title:** DESIGN OPTIMIZATION METHOD FOR SHAPE OF CREASE-SUPPRESSING HOLDER FOR SPACE FILM STRUCTURE

(54) 发明名称: 一种抑制褶皱的空间薄膜结构夹具形状优化设计方法

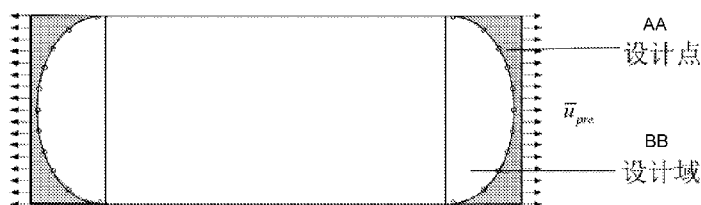


图 1

AA Design point
BB Design region

(57) **Abstract:** A design optimization method for the shape of a crease-suppressing holder for a space film structure, solving the problem in which a space film structure is prone to creases under a tensile force of a conventional holder. The method comprises: on the basis of nonlinear finite unit analysis, changing a loading boundary condition by optimizing a holder shape, maximizing the minimum principal stress of units in a film region, adjusting a principal stress distribution, and using a global optimization algorithm to find a global optimal design, so as to obtain a novel holder pattern having an arch-shaped or convex border, thereby completely suppressing creases. The method suppresses generation of creases in a thin film without cutting the thin film, thereby ensuring a sufficiently large operation area of the thin film. The invention is suitable for designing a holder of a space film structure, such as a space antenna or a solar sail, facilitates crease suppression of a film, and guarantees the operational performance of the structure without increasing costs for manufacturing, launching, and operations.

(57) **摘要:** 一种抑制褶皱的空间薄膜结构夹具形状优化设计方法, 解决空间薄膜结构在传统夹具拉伸作用下容易产生褶皱现象的问题。在非线性有限元分析基础上, 通过优化夹具的形状改变加载边界条件, 最大化薄膜区域内单元的最小主应力, 调控薄膜的主应力分布, 采用全局优化算法寻找全局最优设计, 进而获得"弓形"和"凸形"边界的新型夹具形式, 以达到完全抑制褶皱的目的。该方法不仅抑制薄膜中褶皱的产生, 而且不对薄膜进行裁剪, 能够保证薄膜具有足够大的工作面积; 适合于空间天线、太阳帆等空间薄膜结构的夹具设计, 有利于抑制薄膜褶皱, 保证结构工作性能, 并且不增加任何制造、发射及运行成本。

LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX,
MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL,
PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL,
SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG,
US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。

(84) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的地区
保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ,
NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM,
AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG,
CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU,
IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT,
RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI,
CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

— 包括国际检索报告 (条约第21条(3))。

一种抑制褶皱的空间薄膜结构夹具形状优化设计方法

技术领域

本发明属于航天薄膜结构设计领域，涉及一种空间薄膜结构的夹具形状优化设计方法。

背景技术

柔性薄膜具备重量轻、能承受大变形、易于折叠/展开等优点，广泛用于航天空间结构。薄膜和展开机构之间通过刚性夹具连接，在太空中展开后使得膜面内产生张拉应力，用以实现其特定功能。然而，由于薄膜几乎不能承受面内压缩应力，在外荷载作用下容易出现面外屈曲，即褶皱现象。对传统设计给出的结构形式进行物理试验及有限元分析表明：空间薄膜结构在展开后容易产生大量褶皱，会严重影响空间结构的形面精度和使用性能。针对此问题，通过在薄膜内部或边缘进行挖孔，虽然能够抑制褶皱，但必然会减少薄膜面积。为得到既能保证高精度形面要求，又具有足够大薄膜工作面积的有效结构形式，一个非常有效的方法是采用优化设计的手段重新设计夹具结构形式，通过改变薄膜的位移加载边界条件来调整薄膜内部区域的应力分布情况，使整个薄膜区域的最小主应力增大为正值，达到预期的完全张拉状态。

发明内容

针对空间薄膜的高精度形面要求及大面积工作膜面要求，本发明提供一种支撑夹具的形状优化设计方法，该方法能够提高薄膜的最小主应力，抑制薄膜中褶皱的产生，同时能够保证薄膜具有足够大的工作面积。本发明适合于空间天线、太阳帆等空间薄膜结构的夹具设计，有利于抑制薄膜褶皱，保证结构工作性能，并且不增加任何制造、发射及运行成本。

为了达到上述目的，本发明的技术方案为：

一种抑制褶皱的薄膜结构夹具形状优化设计方法，主要包括夹具部件形状优

化和空间薄膜结构数值验证两部分，具体步骤如下：

第一步，对夹具部件进行形状优化

传统设计给出的薄膜夹具边线一般为直线，在通过夹具施加位移拉伸载荷作用后，薄膜局部的最小主应力为零或负值，从而发生褶皱现象，不满足形面要求。为得到满足膜面精度设计要求和面积要求的空间薄膜结构，本发明通过形状优化的手段重新设计夹具形式，使得薄膜最小主应力为正值，拟制褶皱产生。

1.1) 根据结构的尺寸要求和实际加载情况确定设计域，划分有限元单元网格，建立带夹具的薄膜结构有限元模型。所述的薄膜结构有限元模型中，刚性夹具部件用弹性模量足够大的材料进行模拟；在薄膜与夹具的连接线上选取若干设计点，用 B 样条函数插值生成夹具和薄膜边界；所述夹具材料的弹性模量不小于薄膜的 1000 倍。

1.2) 对刚性夹具施加位移荷载，采用非线性有限元分析方法对所述薄膜结构有限元模型进行分析。

1.3) 以薄膜区域内最小主应力最大化为最终设计目标，对夹具的边线进行设计，构造形状优化模型：

(a) 目标：使薄膜区域的最小主应力最大化，即 $\max \left\{ \min_{e \in \Omega_m} S_2^e \right\}$ ；其中， e 为有限元单元编号， S_2 为最小主应力， Ω_m 为薄膜区域。

(b) 约束：确定薄膜面积用量，作为约束下限。所述的面积用量不小于初始薄膜面积的 95%。

(c) 设计变量：夹具边线上设计点的坐标。

1.4) 根据步骤 1.3) 建立的形状优化模型，对极小极大优化目标进行凝聚变换，得到等效的优化目标函数。所述凝聚变换包括 p-norm 方法，其中 p-norm 凝

聚函数的表达式为 $\min \left(\sum_{e \in \Omega_m} \left(\max \{0, S^* - S_2^e\} \right)^p \right)^{1/p}$ ，其中 S^* 为期望达到的最小主应力，取 0.1-1.0， p 为凝聚参数，取为 20-50。

1.5) 根据步骤 1.3) 和 1.4) 建立的形状优化模型，采用全局优化算法进行求解，得到夹具形状优化问题的全局最优解。所述优化算法为代理模型算法、遗传算法或基于梯度的优化算法。

第二步，对空间薄膜结构进行数值验证

在第一步 1.5) 得到的优化后夹具形式的基础上，通过引入薄膜随机缺陷，进行非线性后屈曲分析，对优化后的空间薄膜结构进行效果验证。

本发明的有益效果为：在优化前，夹具为直线形式，薄膜区域在拉伸载荷作用下存在最小主应力为零或负值的情况，从而产生褶皱，不满足高精度形面要求。采用本发明方法得到的“曲边”形式的夹具后，薄膜在荷载作用下不再产生褶皱，最小主应力为正值，也能够保证薄膜面积。该夹具构型比较简单，易于加工制造，且有利于装配以及空间展开，经有限元分析和地面静力试验验证，该结构满足性能要求。

附图说明

图 1 为本发明实施例提供的一种空间薄膜天线结构设计域。图中： $\bar{u}_{pre}$ 表示施加在夹具上的位移荷载。

图 2 (a) 为空间薄膜天线结构的单个夹具最优设计图。

图 2 (b) 为采用本发明方法设计得到的空间薄膜天线结构效果图。

图 3 为本发明实施例提供的一种太阳帆结构设计域。

图 4 (a) 为太阳帆结构的单个夹具最优设计图。

图 4 (b) 为采用本发明方法设计得到的太阳帆结构效果图。

具体实施方式

以下结合技术方案和附图详细叙述本发明的具体实施例。

第一步，对夹具部件进行形状优化

1.1) 根据结构的尺寸要求和实际加载情况确定设计域，并划分有限元单元网格，建立带夹具的薄膜结构有限元模型。刚性夹具部件用 1000 倍薄膜的弹性模量进行模拟。在薄膜与夹具的连接线上选取若干设计点，用 B 样条函数插值生成夹具和薄膜边界。图 1 为空间薄膜天线结构的设计域，根据结构上下对称性，每个夹具选取 11 个设计点，图 3 为太阳帆结构设计域，根据其对称性，每个夹具选取 9 个设计点。两种初始结构在拉伸荷载作用下均存在明显的褶皱行为。

1.2) 对刚性夹具施加位移荷载，采用非线性有限元分析方法对薄膜结构有限元模型进行分析，获得每个单元的最小主应力。

1.3) 以薄膜区域内最小主应力最大化为最终设计目标，对夹具的边线进行设计，构造形状优化模型：

(a) 目标：使薄膜区域的最小主应力最大化，即 $\max \left\{ \min_{e \in \Omega_m} S_2^e \right\}$ ；其中， e 为有限元单元编号， S_2 为最小主应力， Ω_m 为薄膜区域；

(b) 约束：确定薄膜面积用量，作为约束下限。所述的面积用量为初始薄膜面积的 95%。

(c) 设计变量：夹具边线上设计点的坐标。

1.4) 根据步骤 1.3) 建立的形状优化模型，对极小极大优化目标进行凝聚变换，所述凝聚变换为 $\min \left(\sum_{e \in \Omega_m} \left(\max \{0, S^* - S_2^e\} \right)^p \right)^{1/p}$ ，其中 S^* 为期望达到的最小主应力，取 0.5， p 为凝聚参数，取为 20。

1.5) 根据步骤 1.3) 和 1.4) 建立的形状优化问题，采用全局优化算法（如

Kriging 代理模型方法) 进行求解, 得到夹具形状优化问题的全局最优解, 最终得到“弓形”、“凸形”边界的夹具形式。空间薄膜天线和太阳帆的夹具形状分别见图 2 (a) 和图 4 (a) 所示。

第二步, 对空间薄膜结构进行数值验证

在第一步 1.5) 得到的优化后夹具形式的基础上, 通过引入薄膜随机缺陷, 进行非线性后屈曲分析, 对优化后的空间薄膜结构进行效果验证。结果表明优化得到的“弓形”夹具 (如图 2 (b) 所示, 薄膜面外位移接近于 0, 没有局部褶皱现象, 图中两侧颜色较深的为夹具, 浅灰色区域表示为薄膜) 和“凸形”夹具 (如图 4 (b) 所示, 薄膜面外位移接近于 0, 没有局部褶皱现象, 图中四个角黑色区域表示为夹具, 浅灰色区域表示为薄膜) 分别有利于提高两种结构的薄膜最小主应力, 在不裁剪薄膜、不增加运行成本的情况下避免了局部褶皱现象, 满足高精度形面要求。

权 利 要 求 书

1.一种抑制褶皱的空间薄膜结构夹具形状优化设计方法，其特征在于以下步骤：

第一步，对夹具部件进行形状优化

1.1) 根据结构的尺寸要求和实际加载情况确定设计域，划分有限元单元网格，建立带夹具的薄膜结构有限元模型；所述的薄膜结构有限元模型中，刚性夹具部件用弹性模量大的材料进行模拟；在薄膜与夹具的连接线上选取若干设计点，用 B 样条函数插值生成夹具和薄膜边界；

1.2) 对刚性夹具施加位移荷载，采用非线性有限元分析方法对所述薄膜结构有限元模型进行分析；

1.3) 以薄膜区域内最小主应力最大化为最终设计目标，对夹具的边线进行设计，构造形状优化模型：

(a)目标：使薄膜区域的最小主应力最大化，即 $\max \left\{ \min_{e \in \Omega_m} S_2^e \right\}$ ；其中， e 为有限元单元编号， S_2 为最小主应力， Ω_m 为薄膜区域；

(b)约束：确定薄膜面积用量，作为约束下限；所述的面积用量不小于初始薄膜面积的 95%；

(c)设计变量：夹具边线上设计点的坐标；

1.4) 根据步骤 1.3) 建立的形状优化模型，对极小极大优化目标进行凝聚变换；

1.5) 根据步骤 1.3) 和 1.4) 建立的形状优化问题，采用全局优化算法进行求解，得到夹具形状优化问题的全局最优解；

第二步，对空间薄膜结构进行数值验证

在第一步 1.5) 得到的优化后夹具形式的基础上，通过引入薄膜随机缺陷，进行非线性后屈曲分析，对优化后的空间薄膜结构进行效果验证。

2.根据权利要求 1 所述的一种抑制褶皱的空间薄膜结构夹具形状优化设计方法，

其特征在于，步骤 1.1) 中所述材料的弹性模量不小于薄膜的 1000 倍。

3. 根据权利要求 1 或 2 所述的一种抑制褶皱的空间薄膜结构夹具形状优化设计方法，其特征在于，步骤 1.4) 中所述凝聚变换包括 p-norm 方法，其中 p-norm 凝聚函数的表达式为 $\min \left(\sum_{e \in \Omega_m} \left(\max \{0, S^* - S_2^e\} \right)^p \right)^{1/p}$ ，其中 S^* 为期望达到的最小主

应力，取 0.1-1.0， p 为凝聚参数，取为 20-50。

4. 根据权利要求 1 或 2 所述的一种抑制褶皱的空间薄膜结构夹具形状优化设计方法，其特征在于，步骤 1.5) 所述优化算法为代理模型算法、遗传算法或基于梯度的优化算法。

5. 根据权利要求 3 所述的一种抑制褶皱的空间薄膜结构夹具形状优化设计方法，其特征在于，步骤 1.5) 所述优化算法为代理模型算法、遗传算法或基于梯度的优化算法。

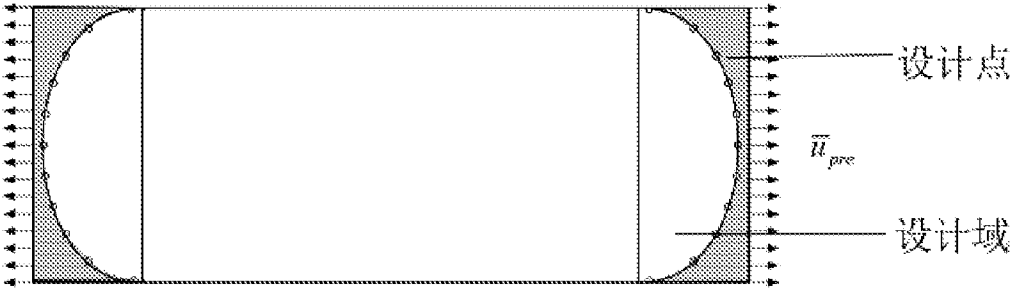


图 1



图 2 (a)

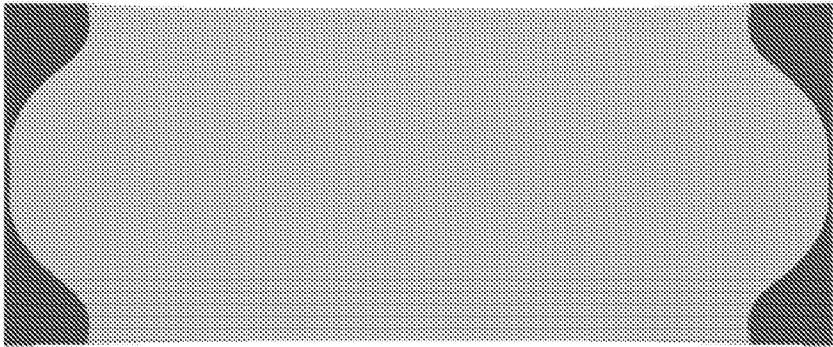


图 2 (b)

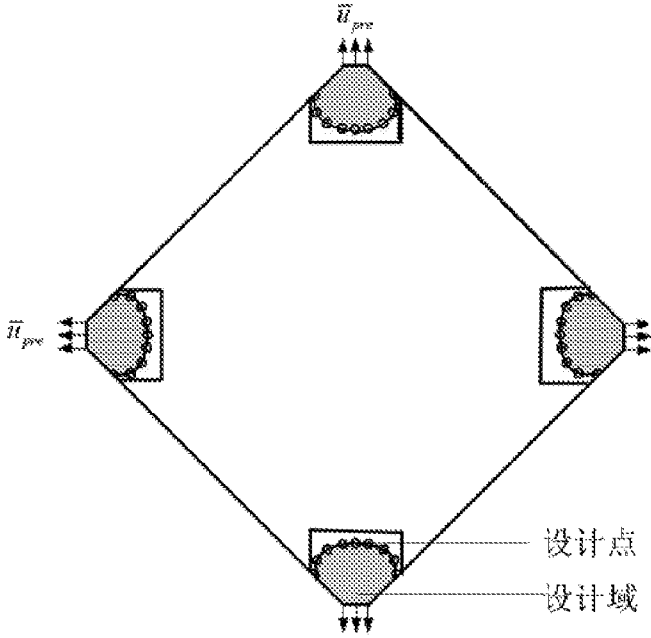


图 3

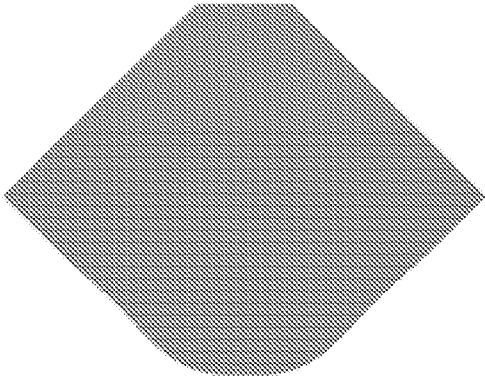


图 4 (a)

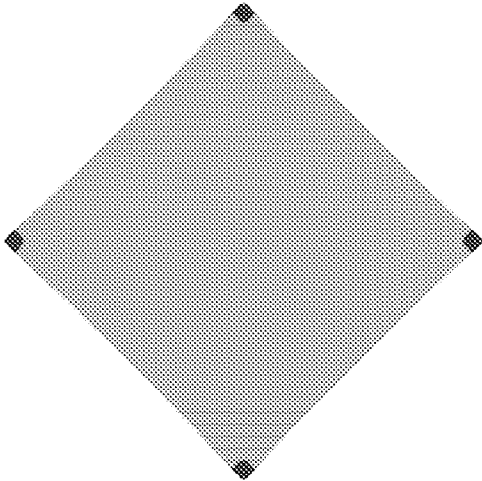


图 4 (b)

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2018/122264

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G06F 17/50(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G06F

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNPAT, WPI, EPODOC, CNKI, IEEE: 薄膜, 柔性, 褶皱, 抑制, 消除, 夹具, 支具, 应力, 优化, 有限元, 目标函数, 约束, 充战, 罗阳军, 大连理工大学, 西北工业大学; thin, film, membrane, crease, fold, wrinkle, restrain, inhibit, clamp, optimization, finite element analysis, stress

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 108133097 A (DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) 08 June 2018 (2018-06-08) claims 1-5	1-5
A	CN 106897491 A (DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) 27 June 2017 (2017-06-27) description, paragraphs [0031]-[0053], and figures 1-3	1-5
A	CN 105868476 A (XIDIAN UNIVERSITY) 17 August 2016 (2016-08-17) entire document	1-5
A	CN 106777768 A (DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) 31 May 2017 (2017-05-31) entire document	1-5
A	US 6876956 B1 (CALIFORNIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY) 05 April 2005 (2005-04-05) entire document	1-5



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
 “E” earlier application or patent but published on or after the international filing date
 “L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
 “O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
 “P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
 “X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
 “Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
 “&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

06 March 2019

Date of mailing of the international search report

18 March 2019

Name and mailing address of the ISA/CN

State Intellectual Property Office of the P. R. China
 No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing
 100088
 China

Facsimile No. (86-10)62019451

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2018/122264

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
CN	108133097	A	08 June 2018	None	
CN	106897491	A	27 June 2017	None	
CN	105868476	A	17 August 2016	None	
CN	106777768	A	31 May 2017	None	
US	6876956	B1	05 April 2005	None	

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2018/122264

A. 主题的分类

G06F 17/50(2006.01)i

按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类

B. 检索领域

检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)

G06F

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称, 和使用的检索词(如使用))

CNPAT, WPI, EPDOC, CNKI, IEEE: 薄膜, 柔性, 褶皱, 抑制, 消除, 夹具, 支具, 应力, 优化, 有限元, 目标函数, 约束, 亢战, 罗阳军, 大连理工大学, 西北工业大学; thin, film, membrane, crease, fold, wrinkle, restrain, inhibit, clamp, optimization, finite element analysis, stress

C. 相关文件

类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
PX	CN 108133097 A (大连理工大学) 2018年 6月 8日 (2018 - 06 - 08) 权利要求1-5	1-5
A	CN 106897491 A (大连理工大学) 2017年 6月 27日 (2017 - 06 - 27) 说明书第[0031]-[0053]段, 图1-3	1-5
A	CN 105868476 A (西安电子科技大学) 2016年 8月 17日 (2016 - 08 - 17) 全文	1-5
A	CN 106777768 A (大连理工大学) 2017年 5月 31日 (2017 - 05 - 31) 全文	1-5
A	US 6876956 B1 (CALIFORNIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY) 2005年 4月 5日 (2005 - 04 - 05) 全文	1-5

☐ 其余文件在C栏的续页中列出。☒ 见同族专利附件。

* 引用文件的具体类型:

“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

“L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的)

“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

“P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件

“X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性

“Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性

“&” 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期

2019年 3月 6日

国际检索报告邮寄日期

2019年 3月 18日

ISA/CN的名称和邮寄地址

中国国家知识产权局 (ISA/CN)
中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088

传真号 (86-10)62019451

受权官员

杜婧子

电话号码 86-(10)-53961529

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2018/122264

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利	公布日 (年/月/日)
CN	108133097	A	2018年 6月 8日	无	
CN	106897491	A	2017年 6月 27日	无	
CN	105868476	A	2016年 8月 17日	无	
CN	106777768	A	2017年 5月 31日	无	
US	6876956	B1	2005年 4月 5日	无	