

(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
2020 年 10 月 22 日 (22.10.2020)



(10) 国际公布号
WO 2020/211007 A1

- (51) 国际专利分类号:
G06F 17/50 (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2019/083019
- (22) 国际申请日: 2019 年 4 月 17 日 (17.04.2019)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (71) 申请人: 大连理工大学 (DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) [CN/CN]; 中国辽宁省大连凌工路 2 号大连理工大学专利中心, Liaoning 116024 (CN)。
- (72) 发明人: 王博(WANG, Bo); 中国辽宁省大连凌工路 2 号大连理工大学专利中心, Liaoning 116024 (CN)。 郝鹏(HAO, Peng); 中国辽宁省大连凌工路 2 号大连理工大学专利中心, Liaoning 116024

- (CN)。 马祥涛(MA, Xiangtao); 中国辽宁省大连凌工路 2 号大连理工大学专利中心, Liaoning 116024 (CN)。 杜凯繁(DU, Kaifan); 中国辽宁省大连凌工路 2 号大连理工大学专利中心, Liaoning 116024 (CN)。 郭杰(GUO, Jie); 中国辽宁省大连凌工路 2 号大连理工大学专利中心, Liaoning 116024 (CN)。 张希(ZHANG, Xi); 中国辽宁省大连凌工路 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, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX,

(54) **Title:** FORM AND POSITION DEVIATION FEATURE LIBRARY ESTABLISHMENT METHOD FOR AEROSPACE THIN-HOUSING STRUCTURE

(54) 发明名称: 一种面向航空航天薄壳结构的形位偏差特征库建立方法

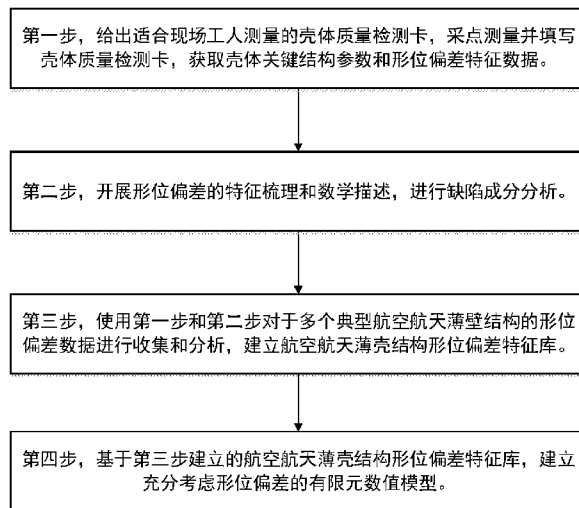


图 1

- AA Step one, provide a housing quality test card suitable for on-site measurement performed by a worker; take a precise measurement, fill in the housing quality test card, and acquire a key structural parameter and form and position deviation feature data of a housing
- BB Step two, perform feature organization and mathematical description of form and position deviation, and perform defect component analysis
- CC Step three, acquire and analyze form and position deviation data of multiple typical aerospace thin-wall structures by means of step one and step two, and establish a form and position deviation feature library of an aerospace thin-housing structure
- DD Step four, on the basis of the form and position deviation feature library of the aerospace thin-housing structure established in step three, establish a finite element numerical model that fully considers form and position deviation

(57) **Abstract:** Provided is a form and position deviation feature library establishment method for an aerospace thin-housing structure, pertaining to the technical field of design of a main bearing component of an aerospace structure, and comprising the following steps: 1) providing a housing quality test card suitable for on-site measurement performed by a worker, taking a precise measurement, filling in the housing quality test card, and acquiring a key structural parameter and form and position deviation feature data of a housing; 2) performing feature organization and mathematical description of form and position deviation on the form and position deviation data acquired in step 1), and performing defect component analysis; and 3) acquiring and analyzing form and position deviation data of multiple typical aerospace thin-wall structures by means of step 1) and step 2), and establishing a form and position deviation feature

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))。

library of an aerospace thin-housing structure. The method facilitates establishment of a form and position deviation feature library of aerospace thin-housing structures having independent intellectual property rights in a nation, thereby effectively advancing the research and development of aerospace devices in a nation, shortening a design cycle, and providing guidance and design specifications for a main bearing thin-housing structure.

(57) 摘要: 提供一种面向航空航天薄壳结构的形位偏差特征库建立方法, 属于航空航天结构主承力构件设计技术领域, 包括以下步骤: 1) 给出适合现场工人测量的壳体质量检测卡, 采点测量并填写壳体质量检测卡, 获取壳体关键结构参数和形位偏差特征数据; 2) 对第一步得到的形位偏差数据, 进行形位偏差的特征梳理和数学描述, 进行缺陷成分分析; 3) 使用第一步和第二步对于多个典型航空航天薄壁结构的形位偏差数据进行收集和分析, 建立航空航天薄壳结构形位偏差特征库。该方法有助于建立拥有过我国自主知识产权的航空航天薄壳结构形位偏差特征库, 能够有效服务于我国航空航天装备的研制, 缩短设计周期, 为主要承力薄壳结构提供指导和设计规范。

一种面向航空航天薄壳结构的形位偏差特征库建立方法

技术领域

本发明属于航空航天结构主承力构件设计技术领域，涉及一种面向航空航天薄壳结构的形位偏差特征库建立方法。

背景技术

薄壳结构具有高比刚度和高比强度，因此被广泛应用于航空航天结构的主承力构件中。航空航天中主承力薄壳结构主要承受轴压载荷，破坏的主要模式为屈曲失稳，因此薄壳结构在轴压工况下的极限承载能力是航空航天结构设计过程中的关键考核指标。然而通过大量轴压圆柱壳试验发现，试验结果和经典理论存在巨大的差异，试验得到的屈曲载荷往往只有经典理论解得 20%-60%，并且实验结果存在巨大的分散和差异性。经过数十年的研究发现，初始几何缺陷的存在是试验结果和理论结果存在巨大差异的主要原因之一。而几何缺陷是加工制造、运输装配、服役等过程中不可避免的，因此如何精确地考虑不同种类的形位偏差（加工制造几何缺陷）是准确预估薄壳结构极限承载力并进行精细化设计的有效途径之一。欧盟采用欧洲钢壳规范的方法，根据初始缺陷的情况对已加工薄壳结构进行评估分级，该方法被认为是圆柱壳稳定设计方面的权威性规范。美国 NASA 使用实验设备测量圆柱壳蒙皮的完整初始几何缺陷并建立初始几何缺陷数据库，为航天薄壳结构设计起到指导作用。我国运载火箭主承力结构采用网格加筋壳结构形式，建立能够充分考虑加筋薄壳结构中不同种类形位偏差的数值模型，是准确预测薄壁筒壳结构实际承载力的有效途径，也是我国运载火箭筒体筒壳结构轻量化设计的基础，建立拥有我国自主知识产权的航空航天薄壳结构形位偏差特征库，更是我国重型运载火箭和大型飞机制造的坚实基础。

航天航空主承力薄壳结构一般包括筒壳结构，锥壳结构，球壳结构和复杂异性曲面薄壳等结构形式。随着有限元等数值分析方法的快速发展，充分考虑形位偏差，建立能够体现不同种类和位置制造几何缺陷的有限元数值模型，进而精确分析计算筒壳结构极限承载能力是航天主承力结构精细化分析与设计的必要途径之一。针对网格加筋薄壳结构，主要的形位偏差包括壳体外表面母线偏移值、端面平整度、蒙皮径向凹陷、焊缝宽度和高度、筋条厚度不均匀度等制造几何缺陷形式。工程中一般采用较为保守的折减因子方法预估薄壳结构的极限承载力，这样限制了航空航天主承力结构的精细化和轻量化设计。因此，亟需建立一种能充分考虑不同种类形位偏差，实现精细化模型的建立方法，并开展一种面向航空航天薄壳结构的形位偏差特征库建立方法，为我国未来重型运载火箭和大型飞机制造提供指导和规范。

发明内容

本发明主要解决现有航空航天薄壳结构数值分析模型难以充分考虑不同类型形位偏差，

难以精细化建模并针对形位偏差进行有效收集和分析的问题。提出一种面向航空航天薄壳结构的形位偏差特征库建立方法，通过填写壳体质量检测卡完成制造特征形位偏差的信息汇总和梳理，在完美有限元网格模型的基础上，采用插值和概率估计的方法对有限元模型中节点坐标进行修调，进而获得考虑不同种类形位偏差的精细化有限元模型，达到精细化建模并有效梳理制造特征，指导优化设计的目的。这种方法方便使用，可实现多种形位偏差的特征梳理并在数值模型中有效体现，并且可以完成航空航天薄壳结构形位偏差特征库的建立，为后续多种型号设计提供规范和设计基础，缩短设计周期。

为了达到上述目的，本发明的技术方案为：

一种面向航空航天薄壳结构的形位偏差特征库建立方法，包括以下步骤：

第一步，为搭建航空航天薄壳结构形位偏差特征库，为航空航天主承力薄壳结构的精细化建模提供数据基础，建立航空航天薄壳结构的设计规范，设计给出适合现场工人测量的壳体质量检测卡，采点测量并填写壳体质量检测卡，获取壳体关键结构参数和形位偏差特征数据。具体为：

针对网格加筋筒壳结构，所述的壳体关键结构参数包括壳体直径、高度、蒙皮厚度，筋条高度及厚度、加紧类型、焊接类型等结构参数和描述。所述的形位偏差特征数据包括壳体外表面母线偏移值、端面平整度、蒙皮径向凹陷、焊缝宽度和高度、筋条厚度不均匀度等形式，各种形位偏差数据测量方法如下：（1）壳体外表面母线偏移值：沿环向每隔一定角度在壳体外表面取一条测量线，测量线尽量避开纵向焊缝，沿测量线长度方向等分形成若干个测量点，利用靠尺测量并记录其径向偏移值，其中内凹为正，外凸为负。（2）端面平整度：沿环向每隔一定角度，利用塞尺测量下端面与地面间的距离 $Z_{\text{下}}$ ，翻转壳体，按照同样环向位置，利用塞尺测量上端面与地面间的距离 $Z_{\text{上}}$ 。（3）蒙皮径向凹陷：通过目测，将蒙皮凹陷由大到小依次排序，测量并记录每个凹陷的位置（轴向坐标和环向角度）、幅值（凹陷深度）。其中内凹为正，外凸为负。（4）焊缝宽度和高度：对每个焊缝，沿轴向或环向等分若干个点，作为测量点，测量并记录每个测量点处的焊缝宽度和高度。（5）筋条厚度不均匀度：沿环向每隔一定角度取一条纵向筋条（或有纵向分量），沿纵向筋条的长度方向等分形成若干个测量点，利用游标卡尺测量并记录其厚度，并统计其不均匀度。需要说明，这些形位偏差数据类型和测量方法同样适用于锥壳、球壳、异性薄壳等其他薄壁结构形式。

通过对单一构件形位偏差数据的统计分析，可以用于实际结构的精细化数值分析，而数据的积累可实现航空航天薄壳结构形位偏差特征库的搭建，服务于我国火箭主承力构件精细化分析和设计，为火箭的进一步减重起到重要作用。所提出的壳体质量检测卡模板起到标准示范作用。

第二步，对第一步得到的形位偏差数据，进行形位偏差的特征梳理和数学描述，进行缺陷成分分析。具体为：

采用数据拟合、概率分布、数据插值等数学方法对壳体质量检测卡中收集的形位偏差特征（制造几何特征）数据进行分析，针对不同类型的形位偏差数据分别建立合适的数学模型，完成制造几何特征的特征梳理和描述。具体为：对于壳体外表面母线偏移值和端面平整度采用数据插值方法或数据拟合方法进行数学建模，所述的数据插值和数据拟合方法包括双线性、最临近、三次样条、多项式、傅里叶等不同形式的插值和函数拟合方法。对于蒙皮径向凹陷，采用凹陷形式的数学描述函数。对于焊缝宽度和高度、筋条厚度不均匀度采用数学概率统计的方法对尺寸的离散程度进行数学描述。

进一步的，对于壳体外表面母线偏移值和端面平整度，最有效的方法是使用傅里叶级数进行数据拟合，将形位偏差在空间频域范围内展开半波余弦或半波正弦的双重傅里叶级数是一种高效准确的三维形貌表征方法。所述的傅里叶半波余弦和半波正弦的双重傅里叶级数分别表示如下：

$$\begin{aligned}\bar{W}(x, y) &= \sum_{k=0}^{n_1} \sum_{l=0}^{n_2} \cos \frac{k\pi x}{L} (A_{kl} \cos \frac{ly}{R} + B_{kl} \sin \frac{ly}{R}) \\ \bar{W}(x, y) &= \sum_{k=0}^{n_1} \sum_{l=0}^{n_2} \sin \frac{k\pi x}{L} (C_{kl} \cos \frac{ly}{R} + D_{kl} \sin \frac{ly}{R})\end{aligned}\quad (1)$$

其中， $\bar{W}$ 为无量纲离面位移， x 为形位偏差环向坐标， y 为形位偏差轴向坐标； L 和 R 为柱壳的名义高度和名义半径； A_{kl} 、 B_{kl} 为半波余弦傅里叶级数的系数； C_{kl} 、 D_{kl} 为半波正弦傅里叶级数的系数； k 和 l 为傅里叶级数系数的编号， n_1 和 n_2 为傅里叶系数的个数。将式(1)转化为广义多变元线性拟合问题，然后使用最小二乘法进行系数的求解。

第三步，采用第一步和第二步的方法对于多个典型航空航天薄壁结构的形位偏差数据进行收集和分析，建立航空航天薄壳结构形位偏差特征库。具体为：

采用第一步获得的壳体质量检测卡对多组典型薄壳结构进行形位偏差数据收集，采用第二步的方法进行形位偏差的特征梳理和数学描述，进行缺陷成分分析。基于薄壳结构的关键几何参数和形位偏差特征进行数据分组归类、无量纲处理、数据存储，完成航空航天薄壳结构形位偏差特征库的建立。基于航空航天薄壳结构形位偏差特征库，可进行薄壳结构的质量评级和缺陷敏感性分析，从而建立不同形式薄壳结构的设计规范，为我国未来重型运载火箭和大飞机制造打下坚实的基础。

第四步，基于第三步建立的航空航天薄壳结构形位偏差特征库，建立充分考虑形位偏差的有限元数值模型。具体为：

首先,采用有限元分析软件 ANSYS、ABAQUS 或 MSC.Patran,针对特定的薄壳结构建立完美的三维有限元模型,该模型为不含有制造几何缺陷的完美三维有限元模型。然后,在航空航天薄壳结构形位偏差特征库中搜索与指定模型具有相同结构形式和相近几何尺寸的形位偏差特征数据;基于该形位偏差的数学特征描述,对形位偏差缺陷进行合理的放缩以适应指定的结构尺寸。最后,采用插值方法对完美结构三维有限元模型整体或局部的节点坐标进行修调或者基于几何参数的概率分布函数为焊缝和筋条选取截面几何尺寸,达到将不同真实制造几何缺陷引入完美结构三维有限元模型的目的,进而获得充分考虑制造几何缺陷的精细化有限元模型。通过对缺陷幅值放大的方法可实现形位偏差数据的可视化,为设计人员提供参考。

另外,第一步中所述的适合现场工人测量的壳体质量检测卡,该模板同样适用于锥壳、球壳等结构形式,该模板可服务于搭建不同结构形式的形位偏差特征库,为建立精细化、真实化数值模型和建立行业规范起到重要作用。

本发明的有益效果为:本发明针对现有的航空航天薄壳结构数值分析模型难以考虑加工制造过程中产生的不同类型形位偏差问题,为搭建航空航天薄壳结构的形位偏差特征库,建立精细化薄壳结构数值模型并进行精细化数值分析,给出了适合现场工人测量使用的壳体质量检测卡,搭建了航空航天薄壳结构的形位偏差特征库,并给出了建立考虑多种形位偏差的精细化有限元模型的方法。可以通过逐点测量的方式对筒壳主要的制造几何缺陷特征信息进行采集,包括:壳体外表面母线偏移值、端面平整度、蒙皮径向凹陷、焊缝宽度和高度、筋条厚度不均匀度。通过对壳体质量检测卡所测量制造几何缺陷的特征梳理和数学描述,建立航空航天薄壳结构的形位偏差特征库,可以通过移动有限元模型节点的方式对完美有限元模型进行修调,从而获得考虑多种制造几何缺陷的精细化有限元数值模型。本发明所建立的航空航天薄壳结构的形位偏差特征库能够充分利用实验构件所体现的真实形位偏差信息,建立考虑不同种类制造几何缺陷的精细化数值分析模型,增强了有限元预测模型的真实性和准确性,进一步提高了有限元预测的准确性。建立拥有过我国自主知识产权的航空航天薄壳结构形位偏差特征库能够有效服务于我国航空航天装备的研制,缩短设计周期,为主要承力薄壳结构提供指导和设计规范。

附图说明

图 1 为本发明提供的面向航空航天薄壳结构的形位偏差特征库建立方法的实现流程图;

图 2 为典型形位偏差示意图;其中,图 2(a)表示壳体外表面母线偏移,图 2(b)表示端面平整度,图 2(c)表示蒙皮径向凹陷,图 2(d)表示焊缝宽度和厚度;

图 3 (a) 为壳体外表面母线偏移形位偏差特征梳理和数学描述效果示意图;

图 3 (b) 为端面平整度形位偏差特征梳理和数学描述效果示意图;

图 3 (c) 为焊缝厚度形位偏差特征梳理和数学描述效果示意图;

图 3 (d) 为筋条厚度形位偏差特征梳理和数学描述效果示意图;

图 4 为轴压筒壳结构的形位偏差放大可视化示意图。

具体实施方式

为使本发明解决的方法问题、采用的方法方案和达到的方法效果更加清楚,下面结合附图和实施例对本发明作进一步的详细说明。可以理解的是,此处所描述的具体实施例仅仅用于解释本发明,而非对本发明的限定。另外还需要说明的是,为了便于描述,附图中仅示出了与本发明相关的部分而非全部内容。

图 1 为本发明实例提供的一种面向航空航天薄壳结构的形位偏差特征库建立方法的实现流程图。如图 1 所示,本发明实施例提供的一种面向航空航天薄壳结构的形位偏差特征库建立方法包括:

第一步,给出适合现场工人测量的壳体质量检测卡,采点测量并填写壳体质量检测卡,获取壳体关键结构参数和形位偏差特征数据。采用逐点测量的方式,对直径 2 米左右的 29 个加筋筒壳的主要形位偏差数据进行测量统计,并填写壳体质量检测卡,获得网格加筋筒壳结构试验件的关键几何参数和形位偏差数据。测量的形位偏差主要包括:壳体外表面母线偏移值、端面平整度、蒙皮径向凹陷、焊缝宽度和高度、筋条厚度不均匀度。图 2 为测量的典型形位偏差示意图。这里采用的壳体质量检测卡模板如下表 1 (a)、表 1 (b) 所示。

表 1: 壳体质量检测卡模板 (a)

壳体几何质量检测卡							____年__月__日
样 件 概 况	壳体外径 D [mm]	壳体高度 L [mm]		蒙皮厚度 t_0 [mm]		样件号	
	筋条高度 h [mm]	筋条宽度 t_r [mm]		焊缝类型		备注	
						图 2 (a) 所示	
	焊缝分布形式	筋条间距		加筋类型			
			☐ 正置正交 ☐ 正置三角 ☐ 倒置三角 ☐ 45°正交 ☐ 其他 _____				
壳 体 外 表 面 母 线 偏 移 值	测量方向 [mm] 环向角度 [度]						测量说明 1. 沿环向每隔 24 度左右在壳体外表面积取一条测量线, 共 15 条。测量线尽量避开纵向焊缝。 2. 沿测量线长度方向等分形成 5 个测量点, 利用游尺测量并记录其径向偏移值。其中内凹为正, 外凸为负。
	0						
	24						
	48						
	72						
	96						
	120						
	144						
	168						
	192						
	216						
	240						
	264						
	288						
	312						
336							
端 面 平 整 度	环向角度 [度]	0	18	36	54	72	图 2 (b) 所示
	$Z_{\downarrow}$ [mm]						
	$Z_{\uparrow}$ [mm]						
	环向角度 [度]	90	108	126	144	162	
	$Z_{\downarrow}$ [mm]						
	$Z_{\uparrow}$ [mm]						
	环向角度 [度]	180	198	216	234	252	
	$Z_{\downarrow}$ [mm]						
	$Z_{\uparrow}$ [mm]						
	环向角度 [度]	270	288	306	324	342	
	$Z_{\downarrow}$ [mm]						
	$Z_{\uparrow}$ [mm]						

表 1: 壳体质量检测卡模板 (b)

蒙皮 径向 凹陷	轴向坐标[mm]											图2 (c) 所示
	环向角度[度]											
	f [mm]											
	c [mm]											
	轴向坐标[mm]											
	环向角度[度]											
	f [mm]											
	c [mm]											
	1. 通过目测, 将蒙皮凹陷由大到小依次排序。 2. 测量并记录每个凹陷的位置 (轴向坐标和环向角度)、数值 (凹陷深度 f 和直径 c)。其中内凹为正, 外凸为负。											
	焊缝 宽度和 厚度	轴向坐标[mm]										
环向角度[度]												
w [mm]												
h_w [mm]												
轴向坐标[mm]												
环向角度[度]												
w [mm]												
h_w [mm]												
轴向坐标[mm]												
环向角度[度]												
w [mm]												
h_w [mm]												
1. 对每个焊缝, 沿轴向或环向等分 10 个点, 作为测量点。 2. 测量并记录每个测量点处的焊缝宽度 w 和高度 h_w 。												
筋条 厚度 不均匀度		轴向坐标[mm] 环向角度[度]										
	0											
	36											
	72											
	108											
	144											
	180											
	216											
	252											
	288											
	324											

第二步，对第一步得到的形位偏差数据，进行形位偏差的特征梳理和数学描述，进行缺陷成分分析。使用数据拟合，概率分布，数据插值等数学方法对壳体质量检测卡中收集的形位偏差特征（制造几何特征）数据进行分析，针对不同类型的形位偏差数据分别建立合适的数学模型，完成制造几何特征的特征梳理和描述。对于本发明实例，壳体外表面母线偏移值使用样条曲线插值；端面平整度使用傅里叶函数拟合；焊缝宽度和高度和筋条厚度不均匀度使用数学概率统计的方法对尺寸的离散程度进行数学描述。图 3 为缺陷特征梳理和数学描述的效果示意图。

第三步，使用第一步和第二步对于多个典型航空航天薄壁结构的形位偏差数据进行收集和分析，建立航空航天薄壳结构形位偏差特征库。

使用第一步获得的壳体质量检测卡对多组典型薄壳结构进行形位偏差数据收集，使用第二步进行形位偏差的特征梳理和数学描述，进行缺陷成分分析。基于薄壳结构的关键几何参数和形位偏差特征进行数据分组归类、无量纲处理、数据存储，完成航空航天薄壳结构形位偏差特征库的建立。

第四步，基于航空航天薄壳结构形位偏差特征库，建立充分考虑形位偏差的有限元数值模型。首先，采用有限元分析软件 ABAQUS 针对特定的薄壳结构建立完美的三维有限元模型，该模型为不含有制造几何缺陷的完美三维有限元模型。然后，在航空航天薄壳结构形位偏差特征库中搜索与指定模型具有相同结构形式和相近几何尺寸的形位偏差特征数据；基于该形位偏差的数学特征描述，对形位偏差缺陷进行合理的放缩以适应指定的结构尺寸。最后，采用插值方法对完美结构三维有限元模型整体或局部的节点坐标进行修调或者基于几何参数的概率分布函数为焊缝和筋条选取截面几何尺寸，达到将不同真实制造几何缺陷引入完美结构三维有限元模型的目的，进而获得充分考虑制造几何缺陷的精细化有限元模型。对于端面平整度，蒙皮径向凹陷可通过准确的数学函数计算节点坐标的偏移量。基于壳体外表面母线偏移值数据插值获得的空间散点数据很难与有限元网格逐一对应，这里采用基于网格节点逐点插值的方法逐一修调蒙皮节点坐标。通过对缺陷幅值放大的方法可实现，形位偏差数据的可视化（如图 4，形位偏差缺陷数据方法 200 倍），为设计人员提供参考。

最后应说明的是：以上各实施例仅用以说明本发明的方法方案，而非对其限制；尽管参照前述各实施例对本发明进行了详细的说明，本领域的普通方法人员应当理解：其对前述各实施例所记载的方法方案进行修改，或者对其中部分或者全部方法特征进行等同替换，并不使相应方法方案的本质脱离本发明各实施例方法方案的范围。

权 利 要 求 书

1.一种面向航空航天薄壳结构的形位偏差特征库建立方法，其特征在于，所述的形位偏差特征库建立方法包括以下步骤：

第一步，设计给出适合现场工人测量的壳体质量检测卡，采点测量并填写壳体质量检测卡，获取壳体关键结构参数和形位偏差特征数据，形位偏差特征数据包括壳体外表面母线偏移值、端面平整度、蒙皮径向凹陷、焊缝宽度和高度、筋条厚度不均匀度；

第二步，对第一步得到的形位偏差数据，进行形位偏差的特征梳理和数学描述，进行缺陷成分分析；

采用数学方法对壳体质量检测卡中收集的形位偏差特征数据进行分析，针对不同类型的形位偏差数据分别建立合适的数学模型，完成形位偏差特征的特征梳理和描述：对于壳体外表面母线偏移值和端面平整度采用数据插值方法或数据拟合方法进行数学建模；对于蒙皮径向凹陷，采用凹陷形式的数学描述函数；对于焊缝宽度和高度、筋条厚度不均匀度采用数学概率统计的方法对尺寸的离散程度进行数学描述；

第三步，采用第一步和第二步的方法对于多个典型航空航天薄壁结构的形位偏差数据进行收集和分析，建立航空航天薄壳结构形位偏差特征库；

采用第一步获得的壳体质量检测卡对多组典型薄壳结构进行形位偏差数据收集，采用第二步的方法进行形位偏差的特征梳理和数学描述，进行缺陷成分分析；基于薄壳结构的关键几何参数和形位偏差特征进行数据分组归类、无量纲处理、数据存储，完成航空航天薄壳结构形位偏差特征库的建立；基于航空航天薄壳结构形位偏差特征库，进行薄壳结构的质量评级和缺陷敏感性分析，建立不同形式薄壳结构的设计规范；

第四步，基于第三步建立的航空航天薄壳结构形位偏差特征库，建立充分考虑形位偏差的有限元数值模型；

首先，针对特定的薄壳结构建立完美的三维有限元模型，该模型为不含有制造几何缺陷的完美三维有限元模型；然后，在航空航天薄壳结构形位偏差特征库中搜索与指定模型具有相同结构形式和相近几何尺寸的形位偏差特征数据；基于该形位偏差的数学特征描述，对形位偏差缺陷进行合理的放缩以适应指定的结构尺寸；最后，采用插值方法对完美结构三维有限元模型整体或局部的节点坐标进行修调或者基于几何参数的概率分布函数为焊缝和筋条选取截面几何尺寸，达到将不同真实制造几何缺陷引入完美结构三维有限元模型的目的，进而获得充分考虑制造几何缺陷的精细化有限元模型；通过对缺陷幅值放大的方法可实现形位偏差数据的可视化，为设计人员提供参考。

2.根据权利要求 1 所述的一种面向航空航天薄壳结构的形位偏差特征库建立方法，其特征在于，第一步中所述的适合现场工人测量的壳体质量检测卡，形位偏差数据类型和测量方法同

样适用于锥壳、球壳、异性薄壳或其他薄壁结构形式，用于搭建不同结构形式的形位偏差特征库，为建立精细化、真实化数值模型和建立行业规范起到重要作用。

3.根据权利要求 1 或 2 所述的一种面向航空航天薄壳结构的形位偏差特征库建立方法，其特征在于，第一步中所述都形位偏差数据测量方法如下：

(1) 壳体外表面母线偏移值：沿环向每隔一定角度在壳体外表面取一条测量线，测量线避开纵向焊缝，沿测量线长度方向等分形成若干个测量点，利用靠尺测量并记录其径向偏移值，其中内凹为正，外凸为负；

(2) 端面平整度：沿环向每隔一定角度，利用塞尺测量下端面与地面间的距离 $Z_{\text{下}}$ ，翻转壳体，按照同样环向位置，利用塞尺测量上端面与地面间的距离 $Z_{\text{上}}$ ；

(3) 蒙皮径向凹陷：通过目测，将蒙皮凹陷由大到小依次排序，测量并记录每个凹陷的位置、幅值；其中内凹为正，外凸为负；

(4) 焊缝宽度和高度：对每个焊缝，沿轴向或环向等分若干个点，作为测量点，测量并记录每个测量点处的焊缝宽度和高度；

(5) 筋条厚度不均匀度：沿环向每隔一定角度取一条纵向筋条，沿纵向筋条的长度方向等分形成若干个测量点，利用游标卡尺测量并记录其厚度，并统计其不均匀度。

4.根据权利要求 1 或 2 所述的一种面向航空航天薄壳结构的形位偏差特征库建立方法，其特征在于，第二步中，对于壳体外表面母线偏移值和端面平整度，优选采用傅里叶级数进行数据拟合，将形位偏差在空间频域范围内展开半波余弦或半波正弦的双重傅里叶级数是一种高效准确的三维形貌表征方法；所述的傅里叶半波余弦和半波正弦的双重傅里叶级数分别表示如下：

$$\begin{aligned}\bar{W}(x, y) &= \sum_{k=0}^{n_1} \sum_{l=0}^{n_2} \cos \frac{k\pi x}{L} (A_{kl} \cos \frac{ly}{R} + B_{kl} \sin \frac{ly}{R}) \\ \bar{W}(x, y) &= \sum_{k=0}^{n_1} \sum_{l=0}^{n_2} \sin \frac{k\pi x}{L} (C_{kl} \cos \frac{ly}{R} + D_{kl} \sin \frac{ly}{R})\end{aligned}\quad (1)$$

其中， $\bar{W}$ 为无量纲离面位移， x 为形位偏差环向坐标， y 为形位偏差轴向坐标； L 和 R 为柱壳的名义高度和名义半径； A_{kl} 、 B_{kl} 为半波余弦傅里叶级数的系数； C_{kl} 、 D_{kl} 为半波正弦傅里叶级数的系数； k 和 l 为傅里叶级数系数的编号， n_1 和 n_2 为傅里叶系数的个数；

将公式(1)转化为广义多变元线性拟合问题，采用最小二乘法求解系数。

5.根据权利要求 3 所述的一种面向航空航天薄壳结构的形位偏差特征库建立方法，其特征在于，第二步中，对于壳体外表面母线偏移值和端面平整度，优选采用傅里叶级数进行数据拟合，将形位偏差在空间频域范围内展开半波余弦或半波正弦的双重傅里叶级数是一种高效准

确的三维形貌表征方法；所述的傅里叶半波余弦和半波正弦的双重傅里叶级数分别表示如下：

$$\begin{aligned}\bar{W}(x, y) &= \sum_{k=0}^{n_1} \sum_{l=0}^{n_2} \cos \frac{k\pi x}{L} (A_{kl} \cos \frac{ly}{R} + B_{kl} \sin \frac{ly}{R}) \\ \bar{W}(x, y) &= \sum_{k=0}^{n_1} \sum_{l=0}^{n_2} \sin \frac{k\pi x}{L} (C_{kl} \cos \frac{ly}{R} + D_{kl} \sin \frac{ly}{R})\end{aligned}\quad (1)$$

其中， $\bar{W}$ 为无量纲离面位移， x 为形位偏差环向坐标， y 为形位偏差轴向坐标； L 和 R 为柱壳的名义高度和名义半径； A_{kl} 、 B_{kl} 为半波余弦傅里叶级数的系数； C_{kl} 、 D_{kl} 为半波正弦傅里叶级数的系数； k 和 l 为傅里叶级数系数的编号， n_1 和 n_2 为傅里叶系数的个数；

将公式(1)转化为广义多变元线性拟合问题，采用最小二乘法求解系数。

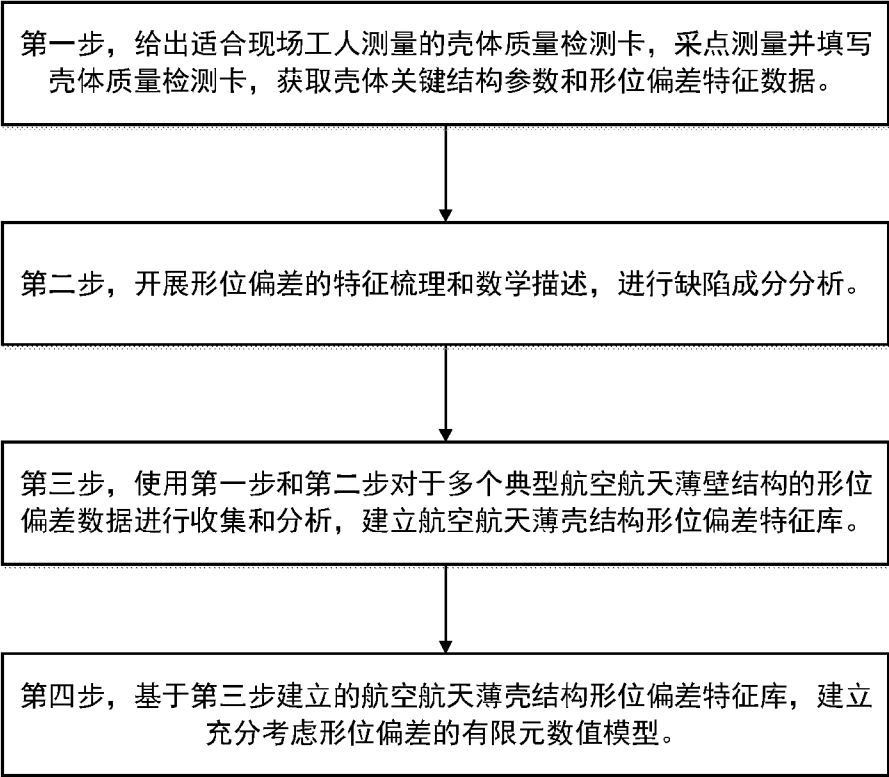


图 1

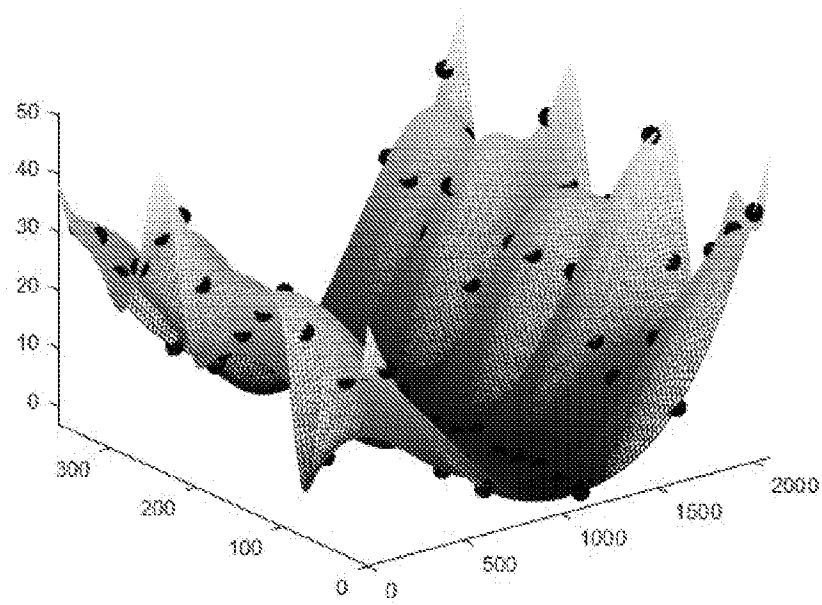


图 3 (a)

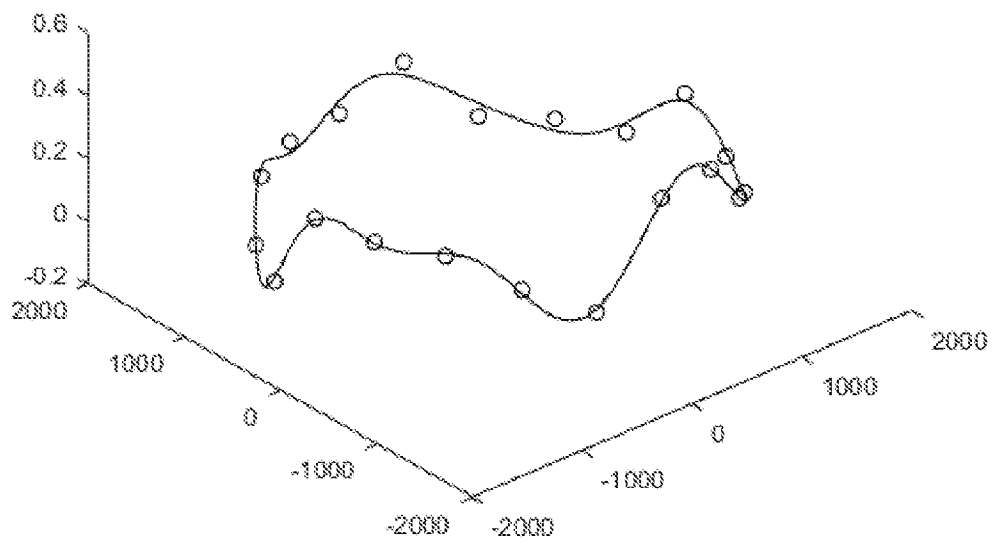


图 3 (b)

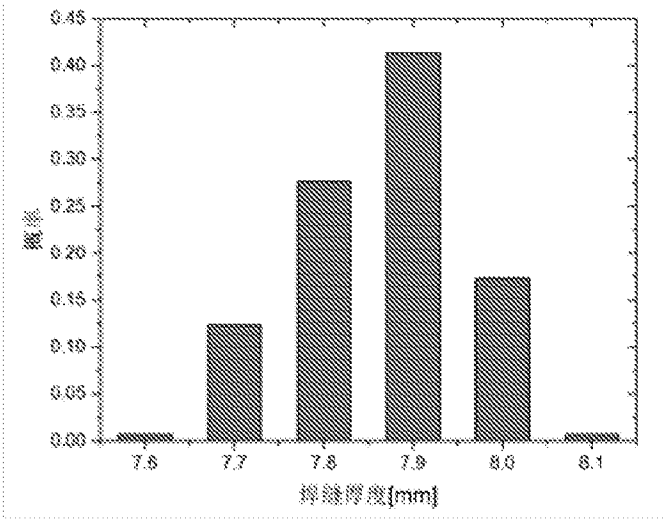


图 3 (c)

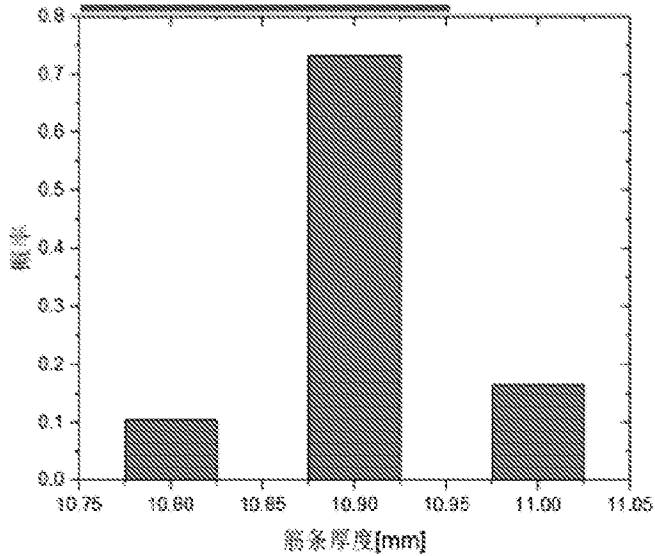


图 3 (d)

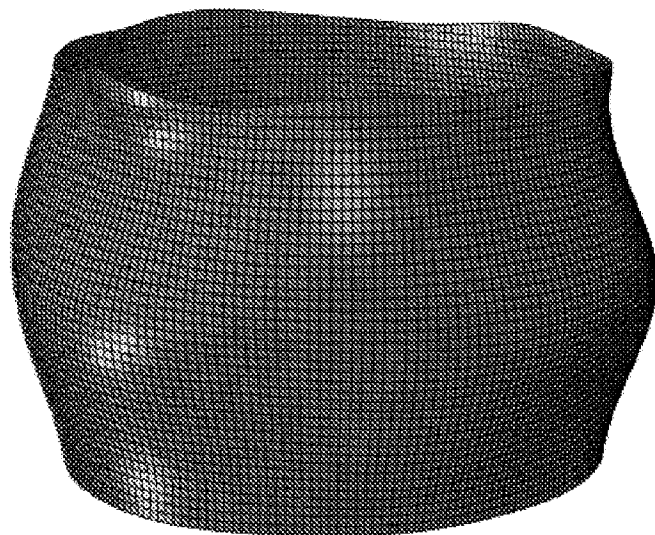


图 4

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2019/083019

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)

B64, 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)

CNABS, CNKI, VEN: 飞机, 飞行器, 航空, 壳, 薄壳, 筋, 偏差, 缺陷, 测量, 检测, 数据库, 模型, 标准, shell, hull, measur+, data, model

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CN 105373653 A (INNER MONGOLIA UNIVERSITY OF SCIENCE & TECHNOLOGY) 02 March 2016 (2016-03-02) entire document	1-5
A	CN 106372283 A (DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) 01 February 2017 (2017-02-01) description, paragraphs 32-41	1-5
A	CN 107818226 A (CSSC HUANGPU WENCHONG SHIPBUILDING COMPANY LIMITED) 20 March 2018 (2018-03-20) entire document	1-5
A	JP H06127464 A (ISHIKAWAJIMA HARIMA HEAVY INDUSTRIES CO., LTD.) 10 May 1994 (1994-05-10) 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

12 June 2019

Date of mailing of the international search report

28 June 2019

Name and mailing address of the ISA/CN

China National Intellectual Property Administration (ISA/CN)
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/CN2019/083019

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
CN	105373653	A	02 March 2016	None	
CN	106372283	A	01 February 2017	None	
CN	107818226	A	20 March 2018	None	
JP	H06127464	A	10 May 1994	None	

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2019/083019

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) B64, 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)) CNABS, CNKI, VEN: 飞机, 飞行器, 航空, 壳, 薄壳, 筋, 偏差, 缺陷, 测量, 检测, 数据库, 模型, 标准, shell, hull, measur+, data, model		
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
A	CN 105373653 A (内蒙古科技大学) 2016年 3月 2日 (2016 - 03 - 02) 全文	1-5
A	CN 106372283 A (大连理工大学) 2017年 2月 1日 (2017 - 02 - 01) 说明书第32-41段	1-5
A	CN 107818226 A (中船黄埔文冲船舶有限公司) 2018年 3月 20日 (2018 - 03 - 20) 全文	1-5
A	JP H06127464 A (ISHIKAWAJIMA HARIMA HEAVY IND) 1994年 5月 10日 (1994 - 05 - 10) 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 6月 12日		国际检索报告邮寄日期 2019年 6月 28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		授权官员 吴洁 电话号码 62085542

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2019/083019

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	105373653	A	2016年 3月 2日	无	
CN	106372283	A	2017年 2月 1日	无	
CN	107818226	A	2018年 3月 20日	无	
JP	H06127464	A	1994年 5月 10日	无	