



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 116465616 A

(43) 申请公布日 2023. 07. 21

(21) 申请号 202310438862.1

(22) 申请日 2023.04.23

(71) 申请人 西北工业大学

地址 710072 陕西省西安市碑林区友谊西路127号

(72) 发明人 王心美 李海涛 赵彦超 李雨薇
孙培杰 刘朴雨 范婷婷 李磊
岳珠峰

(74) 专利代理机构 北京律智知识产权代理有限公司 11438
专利代理师 阚梓瑄

(51) Int. Cl.

G01M 13/00 (2019.01)

G01L 5/00 (2006.01)

G01H 11/06 (2006.01)

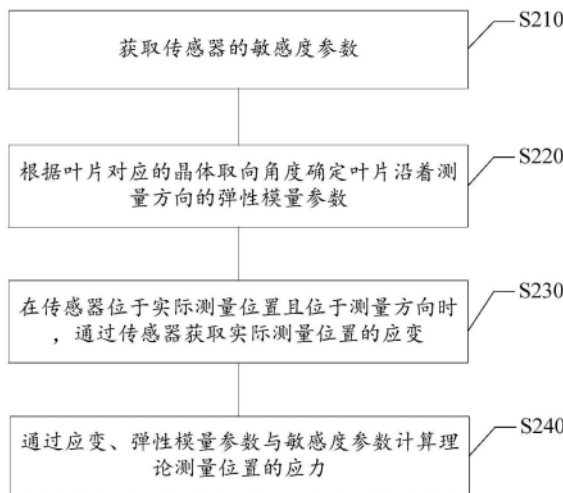
权利要求书3页 说明书18页 附图8页

(54) 发明名称

振动应力测量方法、装置、电子设备及存储介质

(57) 摘要

本公开涉及材料技术领域,具体提供一种振动应力测量方法、振动应力测量装置、电子设备及存储介质,振动应力测量方法包括:获取传感器的敏感度参数;根据叶片对应的晶体取向角度确定叶片沿着测量方向的弹性模量参数;在传感器位于实际测量位置且位于测量方向时,通过传感器获取实际测量位置的应变;通过应变、弹性模量参数与敏感度参数计算理论测量位置的应力。本公开通过提供一种振动应力测量方法,解决了振动应力测量结果不准确的问题。



1. 一种振动应力测量方法,其特征在于,通过传感器测量叶片的应力,所述方法包括:

获取传感器的敏感度参数;其中,所述敏感度参数用于指示叶片上理论测量位置与实际测量位置在相同外因下所受应力的比例关系,所述理论测量位置为所述叶片受振动影响最大的位置,根据所述理论测量位置确定所述实际测量位置;

根据叶片对应的晶体取向角度确定所述叶片沿着测量方向的弹性模量参数;其中,所述测量方向为所述实际测量位置正应力最大的方向;

在所述传感器位于实际测量位置且位于测量方向时,通过所述传感器获取实际测量位置的应变;其中,所述应变用于指示所述叶片在外载荷作用下外形的相对变化,所述外载荷为应力与受力面积的乘积,所述应力为所述叶片内部相互作用的内力;

通过所述应变、所述弹性模量参数与所述敏感度参数计算所述理论测量位置的应力。

2. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于,所述方法还包括:

根据共振分析结果确定对应的第一振动应力场;其中,所述共振分析结果用于指示所述叶片的共振属性,所述第一振动应力场为相对振动应力场,所述相对振动应力场用于指示所述叶片共振时所述叶片各位置所受应力的相对大小;

根据所述叶片的承受载荷属性计算第二振动应力场;其中,所述第二振动应力场为许用振动应力场,所述许用振动应力场用于指示所述叶片上各位置在不发生高周疲劳失效现象条件下所能承受振动应力的最大值;

根据所述第一振动应力场与所述第二振动应力场在叶片上确定所述理论测量位置。

3. 根据权利要求2所述的方法,其特征在于,所述根据所述理论测量位置确定所述实际测量位置,包括:

计算所述理论测量位置的等效应力;

根据所述等效应力确定所述实际测量位置。

4. 根据权利要求3所述的方法,其特征在于,所述根据所述等效应力确定所述实际测量位置,包括:

根据所述等效应力确定多个满足预设条件的候选测量位置;其中,所述预设条件为所述候选测量位置的正应力与所述等效应力的比值超过预设阈值;

在多个候选测量位置中确定正应力最大的实际测量位置。

5. 根据权利要求2所述的方法,其特征在于,所述根据共振分析结果计算第一振动应力场,包括:

建立笛卡尔坐标系;其中,第一坐标轴指向叶片轴向,第二坐标轴指向叶片周向,第三坐标轴指向叶片径向;

获取晶体的枝晶干,并根据所述枝晶干确定第一材料坐标轴、第二材料坐标轴与第三材料坐标轴,以使得根据所述第一材料坐标轴、第二材料坐标轴与第三材料坐标轴建立材料坐标系;其中,第一材料坐标轴与第二材料坐标轴分别为二次枝晶干的两个主方向,第三材料坐标轴为一次枝晶干主方向,所述一次枝晶干的方向为枝晶组织沿纵向择优生长方向,与[001]晶向相同,所述二次枝晶干的方向为枝晶组织横向择优生长方向,与[010]、[100]晶向相同,[001]晶向垂直于[010]、[100]晶向所在的平面;

获取所述笛卡尔坐标系与所述材料坐标系的角度偏差参数;其中,所述角度偏差参数分别为第一坐标轴与第一材料坐标轴的角度偏差、第二坐标轴与第二材料坐标轴的角度偏

差与第三坐标轴与第三材料坐标轴的角度偏差；

通过所述角度偏差参数对所述叶片进行叶片振动特性及响应的有限元分析得到所述共振分析结果。

6. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于,所述方法还包括:

获取所述实际测量位置的应力分量;其中,所述应力分量包括所述实际测量位置受到沿第一坐标轴方向的应力、沿第二坐标轴方向的应力与沿第三坐标轴方向的应力,所述第一坐标轴、所述第二坐标轴与所述第三坐标轴为以所述实际测量位置为原点建立的笛卡尔坐标系的坐标轴;

根据所述实际测量位置与所述叶片上除所述实际测量位置之外的其他位置确定多个候选方向矢量;

根据所述应力分量计算叶片表面沿着各所述候选方向矢量上的正应力,确定正应力最大的候选方向矢量为目标方向矢量;其中,所述目标方向矢量用于指示所述测量方向。

7. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于,所述根据叶片对应的晶体取向角度确定所述叶片沿着测量方向的弹性模量参数,包括:

在叶片上建立笛卡尔坐标系,并确定所述测量方向在所述笛卡尔坐标系的笛卡尔方向矢量;其中,第一坐标轴指向叶片轴向,第二坐标轴指向叶片周向,第三坐标轴指向叶片径向,所述笛卡尔方向矢量为所述测量方向在所述笛卡尔坐标系中的方向矢量;

获取晶体的枝晶干,并根据所述枝晶干确定第一材料坐标轴、第二材料坐标轴与第三材料坐标轴,以使得根据所述第一材料坐标轴、第二材料坐标轴与第三材料坐标轴建立材料坐标系;其中,第一材料坐标轴与第二材料坐标轴分别为二次枝晶干的两个主方向,第三材料坐标轴为一次枝晶干主方向,所述一次枝晶干的方向为枝晶组织沿纵向择优生长方向,与[001]晶向相同,所述二次枝晶干的方向为枝晶组织横向择优生长方向,与[010]、[100]晶向相同,[001]晶向垂直于[010]、[100]晶向所在的平面;

获取所述实际测量位置的当前温度;

获取所述实际测量位置的第一弹性模量参数与第二弹性模量参数;其中,所述第一弹性模量参数为所述实际测量位置处于第一温度时沿着所述预设方向的弹性模量参数,所述第二弹性模量参数为所述实际测量位置处于第二温度时沿着所述预设方向的弹性模量参数,所述第一温度、所述第二温度与所述当前温度为互相不同的温度;

根据所述笛卡尔方向矢量计算材料方向矢量;其中,所述材料方向矢量为所述测量方向在所述材料坐标系中的方向矢量;

根据所述当前温度、所述第一弹性模量参数、所述第二弹性模量参数与所述材料方向矢量计算所述弹性模量参数。

8. 一种振动应力测量装置,其特征在于,包括:

第一参数获取模块,用于获取传感器的敏感度参数;其中,所述敏感度参数用于指示叶片上理论测量位置与实际测量位置在相同外因下所受应力的比例关系,所述理论测量位置为所述叶片受振动影响最大的位置,根据所述理论测量位置确定所述实际测量位置;

第二参数获取模块,用于根据叶片对应的晶体取向角度确定所述叶片沿着测量方向的弹性模量参数;其中,所述测量方向为所述实际测量位置正应力最大的方向;

第三参数获取模块,用于在所述传感器位于实际测量位置且位于测量方向时,通过所

述传感器获取实际测量位置的应变;其中,所述应变用于指示所述叶片在外载荷作用下外形的相对变化,所述外载荷为应力与受力面积的乘积,所述应力为所述叶片内部相互作用的内力;

计算模块,用于通过所述应变、所述弹性模量参数与所述敏感度参数计算所述理论测量位置的应力。

9. 一种电子设备,其特征在于,包括:

处理器;以及

存储器,用于存储所述处理器的可执行指令;

其中,所述处理器配置为经由执行所述可执行指令来执行权利要求1-7任一项所述的振动应力测量方法。

10. 一种非临时性计算机可读存储介质,其特征在于,当所述存储介质中的指令由电子设备的处理器执行时,使得所述电子设备能够执行权利要求1-7任一项所述的振动应力测量方法。

振动应力测量方法、装置、电子设备及存储介质

技术领域

[0001] 本公开涉及材料领域,具体而言,涉及一种振动应力测量方法、振动应力测量装置、电子设备及存储介质。

背景技术

[0002] 航空发动机的高压涡轮叶片由于受载环境恶劣,承受高温、高压以及高速旋转产生的离心力载荷的共同作用,容易引起高周疲劳失效从而导致重大航空事故。高压涡轮冷却叶片是否发生高周疲劳失效的关键在于其实际工作时振动应力是否超过疲劳强度极限。因此如何在航空发动机研制与试车过程中准确测量叶片具体的振动应力数值大小是亟待解决的技术问题。

[0003] 相关技术中,振动应力的测量方式为在叶片表面敷设电阻应变片,测量叶片在工作过程中产生的振动应变值大小,然后通过材料本构关系计算出振动应力的大小。但是,现有发动机叶片材料是镍基单晶高温合金材料,存在明显的晶体取向作用,对应变计的敏感度产生影响,同时也导致在同一温度下各方向的弹性模量参数相差较大,而弹性模量参数的误差会直接影响振动应力的测量结果,而相关技术并未考虑材料的晶体取向作用,测量结果会产生较大误差、准确性低。

[0004] 需要说明的是,在上述背景技术部分公开的信息仅用于加强对本公开的背景的理解,因此可以包括不构成对本领域普通技术人员已知的现有技术的信息。

发明内容

[0005] 本公开的目的在于提供一种振动应力测量方法、振动应力测量装置、电子设备及存储介质,可以提高测量结果的准确性,降低测量误差。

[0006] 根据本公开的一个方面,提供一种振动应力测量方法,包括:获取传感器的敏感度参数;其中,敏感度参数用于指示叶片上理论测量位置与实际测量位置在相同外因下所受应力的比例关系,理论测量位置为叶片受振动影响最大的位置,根据理论测量位置确定实际测量位置;根据叶片对应的晶体取向角度确定叶片沿着测量方向的弹性模量参数;其中,测量方向为实际测量位置正应力最大的方向;在传感器位于实际测量位置且位于测量方向时,通过传感器获取实际测量位置的应变;其中,应变用于指示叶片在外载荷作用下外形的相对变化,外载荷为应力与受力面积的乘积,应力为叶片内部相互作用的内力;通过应变、弹性模量参数与敏感度参数计算理论测量位置的应力。

[0007] 在本公开的一个示例性实施例中,方法还包括:根据共振分析结果确定对应的第一振动应力场;其中,共振分析结果用于指示叶片的共振属性,第一振动应力场为相对振动应力场,相对振动应力场用于指示叶片共振时叶片各位置所受应力的相对大小;根据叶片的承受载荷属性计算第二振动应力场;其中,第二振动应力场为许用振动应力场,许用振动应力场用于指示叶片上各位置在不发生高周疲劳失效现象条件下所能承受振动应力的最大值;根据第一振动应力场与第二振动应力场在叶片上确定理论测量位置。

[0008] 在本公开的一个示例性实施例中,根据理论测量位置确定实际测量位置,方法还包括:计算理论测量位置的等效应力;根据等效应力确定实际测量位置。

[0009] 在本公开的一个示例性实施例中,根据等效应力确定实际测量位置,方法还包括:根据等效应力确定多个满足预设条件的候选测量位置;其中,预设条件为候选测量位置的正应力与等效应力的比值超过预设阈值;在多个候选测量位置中确定正应力最大的实际测量位置。

[0010] 在本公开的一个示例性实施例中,根据共振分析结果计算第一振动应力场,方法还包括:建立笛卡尔坐标系;其中,第一坐标轴指向叶片轴向,第二坐标轴指向叶片周向,第三坐标轴指向叶片径向;获取晶体的枝晶干,并根据枝晶干确定第一材料坐标轴、第二材料坐标轴与第三材料坐标轴,以使得根据第一材料坐标轴、第二材料坐标轴与第三材料坐标轴建立材料坐标系;其中,第一材料坐标轴与第二材料坐标轴分别为二次枝晶干的两个主方向,第三材料坐标轴为一次枝晶干主方向,一次枝晶干的方向为枝晶组织沿纵向择优生长方向,与[001]晶向相同,二次枝晶干的方向为枝晶组织横向择优生长方向,与[010]、[100]晶向相同,[001]晶向垂直于[010]、[100]晶向所在的平面;获取笛卡尔坐标系与材料坐标系的角度偏差参数;其中,角度偏差参数分别为第一坐标轴与第一材料坐标轴的角度偏差、第二坐标轴与第二材料坐标轴的角度偏差与第三坐标轴与第三材料坐标轴的角度偏差;通过角度偏差参数对叶片进行叶片振动特性及响应的有限元分析得到共振分析结果。

[0011] 在本公开的一个示例性实施例中,方法还包括:获取实际测量位置的应力分量;其中,应力分量包括实际测量位置受到沿第一坐标轴方向的应力、沿第二坐标轴方向的应力与沿第三坐标轴方向的应力,第一坐标轴、第二坐标轴与第三坐标轴为以实际测量位置为原点建立的笛卡尔坐标系的坐标轴;根据实际测量位置与叶片上除实际测量位置之外的其他位置确定多个候选方向矢量;根据应力分量计算叶片表面沿着各候选方向矢量上的正应力,确定正应力最大的候选方向矢量为目标方向矢量;其中,目标方向矢量用于指示测量方向。

[0012] 在本公开的一个示例性实施例中,根据叶片对应的晶体取向角度确定叶片沿着测量方向的弹性模量参数,方法还包括:在叶片上建立笛卡尔坐标系,并确定测量方向在笛卡尔坐标系的笛卡尔方向矢量;其中,第一坐标轴指向叶片轴向,第二坐标轴指向叶片周向,第三坐标轴指向叶片径向,笛卡尔方向矢量为测量方向在笛卡尔坐标系中的方向矢量;获取晶体的枝晶干,并根据枝晶干确定第一材料坐标轴、第二材料坐标轴与第三材料坐标轴,以使得根据第一材料坐标轴、第二材料坐标轴与第三材料坐标轴建立材料坐标系;其中,第一材料坐标轴与第二材料坐标轴分别为二次枝晶干的两个主方向,第三材料坐标轴为一次枝晶干方向,一次枝晶干的方向为枝晶组织沿纵向择优生长方向,与[001]晶向相同,二次枝晶干的方向为枝晶组织横向择优生长方向,与[010]、[100]晶向相同,[001]晶向垂直于[010]、[100]晶向所在的平面;获取实际测量位置的当前温度;获取实际测量位置的第一弹性模量参数与第二弹性模量参数;其中,第一弹性模量参数为实际测量位置处于第一温度时沿着预设方向的弹性模量参数,第二弹性模量参数为实际测量位置处于第二温度时沿着预设方向的弹性模量参数,第一温度、第二温度与当前温度为互相不同的温度;根据笛卡尔方向矢量计算材料方向矢量;其中,材料方向矢量为测量方向在材料坐标系中的方向矢量;根据当前温度、第一弹性模量参数、第二弹性模量参数与材料方向矢量计算弹性模量参数。

[0013] 根据本公开的一个方面,提供一种振动应力测量装置,包括第一参数获取模块,用于获取传感器的敏感度参数;其中,敏感度参数用于指示叶片上理论测量位置与实际测量位置在相同外因下所受应力的比例关系,理论测量位置为叶片受振动影响最大的位置,根据理论测量位置确定实际测量位置;第二参数获取模块,用于根据叶片对应的晶体取向角度确定叶片沿着测量方向的弹性模量参数;其中,测量方向为实际测量位置正应力最大的方向;第三参数获取模块,用于在传感器位于实际测量位置且位于测量方向时,通过传感器获取实际测量位置的应变;其中,应变用于指示叶片在外载荷作用下外形的相对变化,所述外载荷为应力与受力面积的乘积,应力为叶片内部相互作用的内力;计算模块,用于通过应变、弹性模量参数与敏感度参数计算理论测量位置的应力。

[0014] 根据本公开的一个方面,提供一种电子设备,包括:

[0015] 处理器;以及存储器,用于存储处理器的可执行指令;其中,处理器配置为经由执行可执行指令来在执行以上任意一项实施例的振动应力测量方法。

[0016] 根据本公开的一个方面,提供一种计算机可读存储介质,当存储介质中的指令有电子设备处理器执行时,使得电子设备能够执行以上任意一项实施例的振动应力测量方法。

[0017] 本公开示例性实施例可以具有以下部分或全部有益效果:

[0018] 在本公开示例实施方式所提供的振动应力测量方法中,获取传感器的敏感度参数,根据叶片对应的晶体取向角度确定叶片沿着测量方向的弹性模量参数,在传感器位于实际测量位置且位于测量方向时,通过传感器获取实际测量位置的应变,通过应变、弹性模量参数与敏感度参数计算理论测量位置的应力。一方面,考虑到晶体取向角度对弹性模量参数的影响,根据晶体取向角度确定弹性模量参数,并将弹性模量参数加入到最终振动应力的计算过程中,减少了因晶体取向引起的弹性模量参数误差而导致的测量结果误差,提高了测量准确性;另一方面,由于在计算各应力场均考虑了晶体取向的作用,因此考虑晶体取向对敏感度参数的影响从而使得敏感度的准确性得到保证;再一方面,考虑到温度、稳态应力、以及相对振动应力三方面因素,能够准确找出理论测量位置,具有更多的现实参考意义。

[0019] 应当理解的是,以上的一般描述和后文的细节描述仅是示例性和解释性的,并不能限制本公开。

附图说明

[0020] 此处的附图被并入说明书中并构成本说明书的一部分,示出了符合本公开的实施例,并与说明书一起用于解释本公开的原理。显而易见地,下面描述中的附图仅仅是本公开的一些实施例,对于本领域普通技术人员来讲,在不付出创造性劳动的前提下,还可以根据这些附图获得其他的附图。

[0021] 图1示意性示出了根据本公开一个实施例中振动应力测量方法的系统架构的示意图。

[0022] 图2示意性示出了根据本公开一个实施例中振动应力测量方法的流程图。

[0023] 图3示意性示出了根据本公开一个实施例中确定理论测量位置的流程图。

[0024] 图4示意性示出了根据本公开一个实施例中根据等效应力确定实际测量位置的流

程图。

[0025] 图5示意性示出了根据本公开一个实施例中确定实际测量位置的流程图。

[0026] 图6示意性示出了根据本公开一个实施例中根据晶体取向角度进行共振分析的流程图。

[0027] 图7示意性示出了根据本公开一个实施例中建立笛卡尔坐标系与材料坐标系的示意图。

[0028] 图8示意性示出了根据本公开一个实施例中建立笛卡尔坐标系与材料坐标系的俯视示意图。

[0029] 图9示意性示出了根据本公开一个实施例中确定测量方向的流程图。

[0030] 图10示意性示出了根据本公开一个实施例中根据晶体取向角度确定弹性模量参数的流程图。

[0031] 图11示意性示出了根据本公开一个实施例中振动应力测量方法的流程图。

[0032] 图12示意性示出了根据本公开的一个实施例的振动应力测量装置的框图。

[0033] 图13示出了适于用来实现本公开实施例的电子设备的计算机系统的结构示意图。

具体实施方式

[0034] 现在将参考附图更全面地描述示例实施方式。然而，示例实施方式能够以多种形式实施，且不应该被理解为先于在此阐述的范例；相反，提供这些实施方式使得本公开将更加全面与完整，并将示例实施方式的构思全面地传达给本领域的技术人员。所描述的特征、结构或特性可以以任何合适的方式结合在一个或更多实施方式中。在下面的描述中，提供许多具体细节从而给出对于本公开的实施方式的充分理解。然而，本领域的技术人员将意识到，可以实践本公开的技术方案而省略特定细节中的一个或更多，或者可以采用其他方法、组元、装置、步骤等。在其他情况下，不详细示出或描述公知技术方案以避免喧宾夺主而使得本公开的各方面变得模糊。

[0035] 附图中的流程图和框图，图示了按照本公开各种实施例的系统、方法和计算机程序产品的可能实现的体系架构、功能和操作。在这点上，流程图或框图中的每个方框可以代表一个模块、程序段、或代码的一部分，上述模块、程序段、或代码的一部分包含一个或多个用于实现规定的逻辑功能的可执行指令。也应当注意，在有些作为替换的实现中，方框中所标注的功能也可以以不同于附图中所标注的顺序发生。例如，两个接连地表示的方框实际上可以基本并行地执行，它们有时也可以按相反的顺序执行，这依所涉及的功能而定。也要注意，框图或流程图中的每个方框、以及框图或流程图中的方框的组合，可以用执行规定的功能或操作的专用的基于硬件的系统来实现，或者可以用专用硬件与计算机指令的组合来实现。

[0036] 描述于本公开实施例中所涉及到的单元可以通过软件的方式实现，也可以通过硬件的方式来实现，所描述的单元也可以设置在处理器中。其中，这些单元的名称在某种情况下并不构成对该单元本身的限定。

[0037] 图1示出了可以应用本公开实施例的一种振动应力测量方法及装置的示例性应用环境的系统架构的示意图。

[0038] 如图1所示，系统架构100可以包括终端设备101、102、103中的一个或多个，网络

104和服务器105。网络104用以在终端设备101、102、103和服务器105之间提供通信链路的介质。网络104可以包括各种连接类型,例如有线、无线通信链路或者光纤电缆等等。终端设备101、102、103可以是具有显示屏的各种电子设备,包括但不限于台式计算机、便携式计算机、智能手机和平板电脑等等。应该理解,图1中的终端设备、网络和服务器的数目仅仅是示意性的。根据实现需要,可以具有任意数目的终端设备、网络和服务器。比如服务器105可以是多个服务器组成的服务器集群等。

[0039] 本公开实施例提供的振动应力测量方法可以在服务器105执行,具体的,获取传感器的敏感度参数,根据叶片对应的晶体取向角度确定叶片沿着测量方向的弹性模量参数,在传感器位于实际测量位置且位于测量方向时,通过传感器获取实际测量位置的应变,通过应变、弹性模量参数与敏感度参数计算理论测量位置的应力。本公开实施例所提供的振动应力测量方法也可以由终端设备101、102、103执行,本公开实施例所提供的振动应力测量方法还可以由终端设备101、102、103与服务器105共同执行,本示例性实施例中对此不做特殊限定。

[0040] 航空发动机的高压涡轮叶片由于受载环境恶劣,承受高温、高压以及高速旋转产生的离心力载荷的共同作用,容易引起高周疲劳失效从而导致重大航空事故。高压涡轮冷却叶片是否发生高周疲劳失效的关键在于其实际工作时振动应力是否超过疲劳强度极限。因此如何在航空发动机研制与试车过程中准确测量叶片具体的振动应力数值大小是亟待解决的技术问题。

[0041] 相关技术中,振动应力的测量方式为在叶片表面敷设电阻应变片,测量叶片在工作过程中产生的振动应变值大小,然后通过材料力学知识计算出振动应力的值。但是,现有发动机叶片材料是正交各向异性材料,存在明显的晶体取向作用,导致在同一温度下各方向的弹性模量参数相差较大,而弹性模量参数的误差会直接影响振动应力的测量结果,而相关技术并未考虑材料的晶体取向作用,测量结果会产生较大误差、准确性低。

[0042] 在本公开的一种示例实施例中提供了一种振动应力测量方法,参考图2所示,该振动应力测量方法可以包括以下步骤:

[0043] 步骤S210,获取传感器的敏感度参数;其中,敏感度参数用于指示叶片上理论测量位置与实际测量位置在相同外因下所受应力的比例关系,理论测量位置为叶片受振动影响最大的位置,根据理论测量位置确定实际测量位置;

[0044] 步骤S220,根据叶片对应的晶体取向角度确定叶片沿着测量方向的弹性模量参数;其中,测量方向为实际测量位置正应力最大的方向;

[0045] 步骤S230,在传感器位于实际测量位置且位于测量方向时,通过传感器获取实际测量位置的应变;其中,应变用于指示叶片在外载荷作用下外形的相对变化,外载荷为应力与受力面积的乘积,应力为叶片内部相互作用的内力;

[0046] 步骤S240,通过应变、弹性模量参数与敏感度参数计算理论测量位置的应力。

[0047] 下面,在对上述步骤进行更加详细的说明。

[0048] 在本公开的一种示例实施例中,提供一种振动应力测量方法,参考图2所示,振动应力测量方法包括以下步骤S210~S240:

[0049] 在步骤S210中,获取传感器的敏感度参数。

[0050] 在本公开的一种示例实施例中,获取传感器的敏感度参数。其中,敏感度参数用于

指示叶片上理论测量位置与实际测量位置在相同外因下所受应力的比例关系,理论测量位置多为涡轮冷却叶片应力集中部位,理论测量位置多因应力梯度大或者曲率较大不适宜直接测量,根据理论测量位置确定实际测量位置。举例而言,叶片可以为镍基单晶高温合金叶片,传感器可以为电阻应变片,理论测量位置可以为气膜孔以及叶根倒角处这些不宜设置传感器的位置,实际测量位置可以为除理论测量位置之外任一适合设置传感器的位置,电阻应变片通过测量叶片在工作过程中产生的振动应变值的大小,然后根据应变值计算得出应力的大小。

[0051] 举例而言,叶片为镍基单晶高温合金叶片,理论测量位置可以是叶片某气膜孔所在的位置,计算理论测量位置处的VonMises应力(范氏应力)作为等效应力,根据理论测量确定了实际测量位置之后,计算实际测量位置出的正应力,正应力为垂直于受力截面的应力,将上述等效应力与正应力的比值作为传感器的敏感度参数。

[0052] 可以理解的是,理论测量位置处的等效应力并不局限于VonMises应力,还可以采用其他方式计算理论测量位置处的等效应力,例如还可以计算理论测量位置处的主应力来作为等效应力,本示例实施例在此不做限定。

[0053] 在步骤S220中,根据叶片对应的晶体取向角度确定叶片沿着测量方向的弹性模量参数。

[0054] 在本公开的一种示例实施例中,根据叶片对应的晶体取向角度确定叶片沿着测量方向的弹性模量参数。其中,测量方向为实际测量位置正应力最大的方向。

[0055] 具体而言,实际测量位置处各方向所受的正应力不同,选择正应力最大的方向为测量方向,获取测量方向之后再确定实际测量位置沿着测量方向的弹性模量参数。

[0056] 举例而言,叶片为镍基单晶高温合金叶片,在叶片表面的实际测量位置处,根据叶片对应的晶体取向角度确定沿着正应力最大的测量方向的弹性模量参数,叶片的晶体取向角度用于指示镍基单晶的共价晶体方向性。

[0057] 共价晶体方向性,即晶体在某一特定方向上形成共价键。根据共价键的量子理论,共价键的强弱取决于电子云的交叠程度。由于非满壳层电子分布的非对称性,因而总是在电子云密度最大的方向成键。

[0058] 在步骤S230中,在传感器位于实际测量位置且位于测量方向时,通过传感器获取实际测量位置的应变。

[0059] 在本公开的一种示例实施例中,在传感器位于实际测量位置且位于测量方向时,通过传感器获取实际测量位置的应变。其中,应变用于指示叶片在外载荷作用下外形的相对变化,应力为叶片内部相互作用的内力。

[0060] 具体而言,在叶片的实际测量位置处安装传感器,传感器的测量方向与实际测量位置正应力最大的方向保持一致,通过传感器获取实际测量位置叶片的应变。

[0061] 举例而言,叶片为镍基单晶高温合金叶片,传感器为电阻应变片,在叶片的实际测量位置处设置电阻应变片,通过电阻应变片获取叶片在实际测量位置处沿着测量方向的应变。

[0062] 在步骤S240中,通过应变、弹性模量参数与敏感度参数计算理论测量位置的应力。

[0063] 在本公开的一种示例实施例中,通过应变、弹性模量参数与敏感度参数计算理论测量位置的应力。其中,通过应变与弹性模量参数可以计算得到实际测量位置的应力,实际

测量位置的应力与理论测量位置的应力的比值满足敏感度参数。

[0064] 具体而言,由于实际测量位置的应力与理论测量位置的应力的比值满足敏感度参数,可以通过传感器测得的应变与计算得到弹性模量参数可以计算得到实际测量位置的应力,再根据该实际测量位置的应力与敏感度参数计算获取理论测量位置的应力。

[0065] 在本公开的一种示例实施例中,根据共振分析结果确认相应的第一振动应力场,根据叶片的承受载荷属性计算第二振动应力场,根据第一振动应力场与第二振动应力场在叶片上确定理论测量位置。具体的,参考图3所示,确定理论测量位置,可以包括以下步骤S310~S330:

[0066] 在步骤S310中,根据共振分析结果计算第一振动应力场。

[0067] 在本公开的一种示例实施例中,根据共振分析结果确定对应的第一振动应力场。其中,共振分析结果用于指示叶片的共振属性,第一振动应力场为相对振动应力场,相对振动应力场用于指示叶片共振时叶片各位置所受应力的相对大小。

[0068] 在步骤S320中,根据叶片的承受载荷属性计算第二振动应力场。

[0069] 在本公开的一种示例实施例中,根据叶片的承受载荷属性计算第二振动应力场。其中,承受载荷属性用于指示叶片允许承受应力的最大值,第二振动应力场为许用振动应力场,许用振动应力场用于指示叶片上各位置在不发生高周疲劳失效现象条件下所能承受振动应力的最大值分布。

[0070] 在步骤S330中,根据第一振动应力场与第二振动应力场在叶片上确定理论测量位置。

[0071] 在本公开的一种示例实施例中,根据第一振动应力场与第二振动应力场在叶片上确定理论测量位置。其中,理论测量位置为振动强度储备最小的位置,该位置最容易受到共振影响。举例而言,理论测量位置可以为叶片气膜孔、叶片叶根倒角以及叶片尾劈缝等位置。

[0072] 举例而言,第一振动应力场为无量纲的相对振动应力场,第二振动应力场为许用振动应力场,根据许用振动应力场与相对振动应力场可以得到振动强度储备最小的位置,若这些位置发生在气膜孔位置,将该气膜孔位置作为理论测量位置。

[0073] 在本公开的一种示例实施例中,通过建立有限元模态分析模型来获取第一振动应力场,通过建立有限元静强度分析模型来获取第二振动应力场。具体的,建立有限元模态分析模型以及绘制Campbell图(坎贝尔图)对叶片进行共振分析,确定用于指示叶片振动应力分布的振动应力场、频率以及振型等共振分析结果,将振动应力场除以叶片最大的振动应力,得到无量纲的相对振动应力场,该相对振动应力场用于指示共振时叶片各位置所受应力的相对大小;通过建立有限元静强度分析模型获得用于叶片承受载荷属性的稳态应力场,将该稳态应力场通过Goodman曲线(古德曼曲线)得到叶片的许用振动应力场,该许用振动应力场用于指示叶片上各位置所能承受振动应力的最大值。

[0074] 通过上述步骤S310~S330,根据共振分析结果确认对应的第一振动应力场,根据叶片的承受载荷属性计算第二振动应力场,根据第一振动应力场与第二振动应力场在叶片上确定理论测量位置。根据第一振动应力场与第二振动应力场的分析,可以准确确认叶片较易发生高周疲劳失效位置,提高了适用性。

[0075] 在本公开的一种示例实施例中,计算理论测量位置的等效应力,根据等效应力确

定实际测量位置。具体的,参考图4所示,根据等效应力确定实际测量位置的流程图,可以包括以下步骤S410~S420:

[0076] 在步骤S410中,计算理论测量位置的等效应力。

[0077] 在本公开的一种示例实施例中,计算理论测量位置的等效应力。其中,等效应力为由材料本构关系计算出的叶片在强度失效时所受的等效应力。举例而言,等效应力可以是VonMises应力也可以是主应力。

[0078] 举例而言,理论测量位置为叶片上的气膜孔位置,计算该气膜孔位置的VonMises应力作为等效应力。

[0079] 可以理解的是,理论测量位置处的等效应力并不局限于VonMises应力,还可以采用其他方式计算理论测量位置处的等效应力,例如还可以计算理论测量位置处的主应力来作为等效应力,本示例实施例在此不做限定。

[0080] 在步骤S420中,根据等效应力确定实际测量位置。

[0081] 在本公开的一种示例实施例中,根据等效应力确定实际测量位置。其中,理论测量位置因应力梯度大或者曲率较大不适宜直接测量,需要根据理论测量位置确定另一处实际测量位置。举例而言,实际测量位置可以是叶片上可以直接设置传感器测量应力的位置。

[0082] 具体而言,结合工程设计要求,根据理论测量位置处的等效应力确定实际测量位置。

[0083] 举例而言,在计算得到理论测量位置的等效应力之后,根据工程设计要求,选择VonMises应力与等效应力的比值大于20%且不存在气膜孔以及倒角的位置作为实际测量位置。

[0084] 通过上述步骤S410~S420,计算理论测量位置的等效应力,根据等效应力确定实际测量位置。实际测量位置进行应力测量相对理论测量位置更精确,而且使得传感器在叶片试车时时生存率更高,降低了应力测量的难度。

[0085] 在本公开的一种示例实施例中,根据等效应力确定多个满足预设条件的候选测量位置,在多个候选测量位置中确定正应力最大的实际测量位置。具体的,参考图5所示,确定实际测量位置,可以包括以下步骤S510~S520:

[0086] 在步骤S510中,根据等效应力确定多个满足预设条件的候选测量位置。

[0087] 在本公开的一种示例实施例中,根据等效应力确定多个满足预设条件的候选测量位置。其中,预设条件为候选测量位置的正应力与等效应力的比值超过预设阈值,候选测量位置为叶片上除理论测量位置之外满足预设条件的位置。举例而言,预设条件可以是候选测量位置的等效应力与理论测量位置等效应力的比值需超过20%,不存在气膜孔以及叶根倒角等条件中的一个或多个。

[0088] 举例而言,在确定候选测量位置以及候选测量位置的等效应力之后,在叶片上选取所有满足等效应力与理论测量位置等效应力的比值需超过20%、不存在气膜孔以及叶根倒角的位置为候选测量位置。

[0089] 在步骤S520中,在多个候选测量位置中确定正应力最大的实际测量位置。

[0090] 在本公开的一种示例实施例中,在多个候选测量位置中确定正应力最大的实际测量位置。其中,正应力为某一方向上的拉应力或压应力,在多个候选测量位置中选择正应力最大的位置为最适合设置传感器的实际测量位置。

[0091] 具体而言,计算各候选测量位置的正应力,将正应力最大的候选测量位置作为实际测量位置。

[0092] 通过上述步骤S510~S520,根据等效应力确定多个满足预设条件的候选测量位置,在多个候选测量位置中确定正应力最大的实际测量位置。挑选出最适宜设置传感器的实际测量位置,进一步降低了应力测量的难度。

[0093] 在本公开的一种示例实施例中,建立笛卡尔坐标系,获取晶体的枝晶干,并根据枝晶干确定第一材料坐标轴、第二材料坐标轴与第三材料坐标轴,以使得根据第一材料坐标轴、第二材料坐标轴与第三材料坐标轴建立材料坐标系,获取笛卡尔坐标系与材料坐标系的角度偏差参数,通过角度偏差参数对叶片进行振动特性分析得到共振分析结果。具体的,参考图6所示,根据晶体取向角度进行振动特性分析,可以包括以下步骤S610~S640:

[0094] 在步骤S610中,建立笛卡尔坐标系。

[0095] 在本公开的一种示例实施例中,建立笛卡尔坐标系。其中,第一坐标轴指向叶片轴向,第二坐标轴指向叶片周向,第三坐标轴指向叶片径向。

[0096] 具体而言,在虚拟环境中在叶片上建立笛卡尔坐标系,笛卡尔坐标系的第一坐标轴指向叶片轴向,第二坐标轴指向叶片周向,第三坐标轴指向叶片高向。

[0097] 在步骤S620中,获取晶体的枝晶干,并根据枝晶干确定第一材料坐标轴、第二材料坐标轴与第三材料坐标轴,以使得根据第一材料坐标轴、第二材料坐标轴与第三材料坐标轴建立材料坐标系。

[0098] 在本公开的一种示例实施例中,获取晶体的枝晶干,并根据枝晶干确定第一材料坐标轴、第二材料坐标轴与第三材料坐标轴,以使得根据第一材料坐标轴、第二材料坐标轴与第三材料坐标轴建立材料坐标系。其中,其中,第一材料坐标轴与第二材料坐标轴分别为二次枝晶干的两个主方向,第三材料坐标轴为一次枝晶干方向,一次枝晶干的方向为枝晶组织沿纵向择优生长方向,与[001]晶向相同,二次枝晶干的方向为枝晶组织横向择优生长方向,与[010]、[100]晶向相同,[001]晶向垂直于[010]、[100]晶向所在的平面。举例而言,叶片为镍基单晶高温合金组成的叶片,一次枝晶干方向为镍基单晶一次枝晶干择优生长的方向,二次枝晶干方向为镍基单晶二次枝晶干择优生长的两个主方向,第一材料坐标轴指向[100]晶向,第二材料坐标轴指向[010]晶向,第三材料坐标轴指向[001]晶向。

[0099] $[1_1 1_2 1_3]$ 为晶体结构中用于指示晶向的表达方式,其中,晶向为晶列的取向,晶列为晶体中任意两格点确定的直线, 1_1 、 1_2 、 1_3 为互质常数,一般被称为晶列指数。

[0100] 具体而言,根据叶片材料的晶体取向特性,确定晶体的晶轴,并根据晶轴建立材料坐标系。

[0101] 举例而言,参考图7所示,叶片为镍基单晶高温合金叶片,在虚拟环境中在叶片上建立笛卡尔坐标系,X轴(第一坐标轴)指向叶片轴向,Y轴(第二坐标轴)指向叶片周向,Z轴(第三坐标轴)指向叶片高向,再根据镍基单晶体的晶体取向特性,确定晶体的晶轴并根据晶轴建立材料坐标系,[100]轴(第一材料坐标轴)为指向[100]晶向的坐标轴,[010]轴(第二材料坐标轴)为指向[010]晶向的坐标轴,[001]轴(第三材料坐标轴)为指向[001]晶向的坐标轴。

[0102] 在步骤S630中,获取笛卡尔坐标系与材料坐标系的角度偏差参数。

[0103] 在本公开的一种示例实施例中,获取笛卡尔坐标系与材料坐标系的角度偏差参

数。其中,角度偏差参数分别为第一坐标轴与第一材料坐标轴的角度偏差、第二坐标轴与第二材料坐标轴的角度偏差与第三坐标轴与第三材料坐标轴的角度偏差。举例而言,可以以笛卡尔坐标系为参考系,将材料坐标系Z-Y-Z欧拉角顺序旋转,得到角度偏差参数。

[0104] 举例而言,以笛卡尔坐标系为参考系,将材料坐标系Z-Y-Z欧拉角顺序旋转,参考图7所示,第一次旋转为绕Z轴旋转使得第一坐标轴与第一材料坐标轴重合,得到第一坐标轴与第一材料坐标轴的角度偏差,第二次旋转为绕第一次旋转之后的Y轴旋转使得第二坐标轴与第二材料坐标轴重合,得到第二坐标轴与第二材料坐标轴的角度偏差,第三次旋转表示绕第二次旋转之后的Z轴旋转使得第三坐标轴与第三材料坐标轴重合,得到第三坐标轴与第三材料坐标轴的角度偏差。

[0105] 笛卡尔坐标系与材料坐标系在虚拟环境中的俯视图如图8所示,其中,X轴为第一坐标轴,Y轴为第二坐标轴,[100]轴为第一材料坐标轴,[010]轴为第二材料坐标轴。

[0106] 在步骤S640中,通过角度偏差参数对叶片进行叶片振动特性的有限元分析得到共振分析结果。

[0107] 在本公开的一种示例实施例中,通过角度偏差参数对叶片进行振动有限元分析得到共振分析结果。其中,角度偏差参数为有限元分析的输入参数。

[0108] 举例而言,构建有限元模态分析模型并绘制Campbell图,将角度偏差参数输入该有限元振动分析模型对叶片进行振动特性及响应分析,得到用于指示叶片的共振属性的共振分析结果。

[0109] 通过上述步骤S610~S640,建立笛卡尔坐标系,获取晶体的枝晶干,并根据枝晶干确定第一材料坐标轴、第二材料坐标轴与第三材料坐标轴,以使得根据第一材料坐标轴、第二材料坐标轴与第三材料坐标轴建立材料坐标系,获取笛卡尔坐标系与材料坐标系的角度偏差参数,通过角度偏差参数对叶片进行振动特性及响应的有限元分析得到共振分析结果。

[0110] 在本公开的一种示例实施例中,获取实际测量位置的应力分量,根据实际测量位置与叶片上除实际测量位置之外的其他位置确定多个候选方向矢量,根据应力分量计算叶片表面沿着各候选方向矢量上的正应力,确定正应力最大的候选方向矢量为目标方向矢量。具体的,参考图9所示,确定测量方向,可以包括以下步骤S910~S930:

[0111] 在步骤S910中,获取实际测量位置的应力分量。

[0112] 在本公开的一种示例实施例中,获取实际测量位置的应力分量。其中,其中,应力分量包括实际测量位置受到的沿第一坐标轴方向的应力、沿第二坐标轴方向的应力与沿第三坐标轴方向的应力,第一坐标轴、第二坐标轴与第三坐标轴为以实际测量位置为原点建立的笛卡尔坐标系的坐标轴。

[0113] 具体而言,在笛卡尔坐标系中,获取实际测量位置受到的第一坐标轴方向的应力、第二坐标轴方向的应力与第三坐标轴方向的应力分量。

[0114] 在步骤S920中,根据实际测量位置与叶片上除实际测量位置之外的其他位置确定多个候选方向矢量。

[0115] 在本公开的一种示例实施例中,根据实际测量位置与叶片上除实际测量位置之外的其他位置确定多个候选方向矢量。其中,候选方向矢量包括叶片上所有经过实际测量位置的方向矢量。

[0116] 具体而言,获取叶片上所有从实际测量位置向外发出的方向矢量作为候选方向矢量。

[0117] 举例而言,读取实际测量位置以及叶片上除实际测量位置之外的其他位置在笛卡尔坐标系下的坐标,用除实际测量位置之外的其他位置的坐标减去实际测量点的坐标,从而获取多个候选方向矢量。

[0118] 在步骤S930中,根据应力分量计算叶片表面沿着各候选方向矢量上的正应力,确定正应力最大的候选方向矢量为目标方向矢量。

[0119] 在本公开的一种示例实施例中,根据应力分量计算叶片表面沿着各候选方向矢量上的正应力,确定正应力最大的候选方向矢量为目标方向矢量。其中,目标方向矢量用于指示测量方向。

[0120] 具体而言,根据材料本构理论,根据候选方向矢量与应力分量计算每个方向上的正应力,选取正应力最大的候选方向矢量为目标方向矢量。

[0121] 举例而言,根据静力平衡方程,将各应力分量分别乘以候选方向矢量在各应力分量方向上的余弦,得到各候选应力分量,分别计算各候选应力分量在该候选方向矢量的投影和作为该候选方向的正应力,选取正应力最大的候选方向矢量为目标方向矢量。

[0122] 通过上述步骤S910~S930,获取实际测量位置的应力分量,根据实际测量位置与叶片上除实际测量位置之外的其他位置确定多个候选方向矢量,根据应力分量计算叶片表面沿着各候选方向矢量上的正应力,确定正应力最大的候选方向矢量为目标方向矢量。给出在实际测量位置最佳的测量方向,进一步提高了测量准确性。

[0123] 在本公开的一种示例实施例中,在叶片上建立笛卡尔坐标系,并确定测量方向在笛卡尔坐标系的笛卡尔方向矢量,获取晶体的枝晶干,并根据枝晶干确定第一材料坐标轴、第二材料坐标轴与第三材料坐标轴,以使得根据第一材料坐标轴、第二材料坐标轴与第三材料坐标轴建立材料坐标系,获取实际测量位置的当前温度,获取实际测量位置的第一弹性模量参数与第二弹性模量参数,根据笛卡尔方向矢量计算材料方向矢量,根据当前温度、第一弹性模量参数、第二弹性模量参数与材料方向矢量计算弹性模量参数。具体的,参考图10所示,根据晶体取向角度确定弹性模量参数,可以包括以下步骤S1010~S1060:

[0124] 在步骤S1010中,在叶片上建立笛卡尔坐标系,并确定测量方向在笛卡尔坐标系的笛卡尔方向矢量。

[0125] 在本公开的一种示例实施例中,在叶片上建立笛卡尔坐标系,并确定测量方向在笛卡尔坐标系的笛卡尔方向矢量。其中,第一坐标轴指向叶片轴向,第二坐标轴指向叶片周向,第三坐标轴指向叶片径向,笛卡尔方向矢量为测量方向在笛卡尔坐标系中的方向矢量。

[0126] 具体而言,在虚拟环境中在叶片上建立笛卡尔坐标系,笛卡尔坐标系的第一坐标轴指向叶片轴向,第二坐标轴指向叶片周向,第三坐标轴指向叶片径向,并确定测量方向在笛卡尔坐标系的方向矢量。

[0127] 在步骤S1020中,获取晶体的枝晶干,并根据枝晶干确定第一材料坐标轴、第二材料坐标轴与第三材料坐标轴,以使得根据第一材料坐标轴、第二材料坐标轴与第三材料坐标轴建立材料坐标系,并确定测量方向在笛卡尔坐标系的方向矢量。

[0128] 在本公开的一种示例实施例中,获取晶体的枝晶干,并根据枝晶干确定第一材料坐标轴、第二材料坐标轴与第三材料坐标轴,以使得根据第一材料坐标轴、第二材料坐标轴

与第三材料坐标轴建立材料坐标系。其中,其中,第一材料坐标轴与第二材料坐标轴分别为二次枝晶干的两个主方向,第三材料坐标轴为一次枝晶干方向,一次枝晶干的方向为枝晶组织沿纵向择优生长方向,与[001]晶向相同,二次枝晶干的方向为枝晶组织横向择优生长方向,与[010]、[100]晶向相同,[001]晶向垂直于[010]、[100]晶向所在的平面。

[0129] 具体而言,根据叶片材料的晶体取向特性,确定晶体的晶轴,并根据晶轴建立材料坐标系。

[0130] 举例而言,参考图7所示,叶片为镍基单晶高温合金叶片,在虚拟环境中在叶片上建立笛卡尔坐标系,X轴(第一坐标轴)指向叶片轴向,Y轴(第二坐标轴)指向叶片周向,Z轴(第三坐标轴)指向叶片高向,再根据镍基单晶体的晶体取向特性,确定晶体的晶轴并根据晶轴建立材料坐标系,[100]轴(第一材料坐标轴)为指向[100]晶向的坐标轴,[010]轴(第二材料坐标轴)为指向[010]晶向的坐标轴,[001]轴(第三材料坐标轴)为指向[001]晶向的坐标轴,笛卡尔坐标系的原点与材料坐标系的原点为同一原点。

[0131] 在步骤S1030中,获取实际测量位置的当前温度。

[0132] 在步骤S1040中,获取实际测量位置的第一弹性模量参数与第二弹性模量参数。

[0133] 在本公开的一种示例实施例中,获取实际测量位置的第一弹性模量参数与第二弹性模量参数。其中,第一弹性模量参数为实际测量位置处于第一温度时沿着预设方向的弹性模量参数,第二弹性模量参数为实际测量位置处于第二温度时沿着预设方向的弹性模量参数,第一温度、第二温度与当前温度为互相不同的温度。举例而言,预设方向可以是[111]晶向。

[0134] 具体而言,获取叶片处于第一温度时沿着预设方向的第一弹性模量参数,获取叶片处于第二温度时沿着预设方向的第二弹性模量参数。

[0135] 举例而言,预设方向为[111]晶向,获取叶片处于第一温度时沿着[111]晶向的第一弹性模量参数,获取叶片处于第二温度时沿着[111]晶向的第二弹性模量参数。

[0136] 在步骤S1050中,根据笛卡尔方向矢量计算材料方向矢量。

[0137] 在本公开的一种示例实施例中,根据笛卡尔方向矢量计算材料方向矢量。其中,材料方向矢量为测量方向在材料坐标系中的方向矢量。

[0138] 具体而言,根据笛卡尔坐标系中的笛卡尔方向矢量、笛卡尔坐标系与材料坐标系的角度偏差参数计算测量方向在材料坐标系中的材料方向矢量。

[0139] 举例而言,以笛卡尔坐标系为参考系,将材料坐标系Z-Y-Z欧拉角顺序旋转,得到角度偏差参数,再根据笛卡尔坐标系中的笛卡尔方向矢量、角度偏差参数计算测量方向在材料坐标系中的材料方向矢量。

[0140] 在步骤S1060中,根据当前温度、第一弹性模量参数、第二弹性模量参数与材料方向矢量计算弹性模量参数。

[0141] 在本公开的一种示例实施例中,根据当前温度、第一弹性模量参数、第二弹性模量参数与材料方向矢量计算弹性模量参数。其中,弹性模量参数为实际测量位置处沿着测量方向的弹性模量参数。

[0142] 举例而言,首先根据当前温度、第一弹性模量参数、第二弹性模量参数计算得到实际测量位置沿着预设方向的弹性模量参数,然后计算笛卡尔坐标系中的用于指示测量方向的笛卡尔方向矢量在材料坐标系中的方向矢量,最后根据实际测量位置沿着预设方向的弹

性模量参数与材料坐标系中的方向矢量计算得到实际测量位置处沿着测量方向的弹性模量参数。

[0143] 通过上述步骤S1010~S1060,在叶片上建立笛卡尔坐标系,并确定测量方向在笛卡尔坐标系的笛卡尔方向矢量,获取晶体的枝晶干,并根据枝晶干确定第一材料坐标轴、第二材料坐标轴与第三材料坐标轴,以使得根据第一材料坐标轴、第二材料坐标轴与第三材料坐标轴建立材料坐标系,获取实际测量位置的当前温度,获取实际测量位置的第一弹性模量参数与第二弹性模量参数,根据笛卡尔方向矢量计算材料方向矢量,根据当前温度、第一弹性模量参数、第二弹性模量参数与材料方向矢量计算弹性模量参数。综合考虑温度与存在晶体取向偏差时沿贴片方向的弹性模量参数大小,使动应力测量更加准确。

[0144] 图11为本公开的一种示例性实施例提出的一种振动应力测量方法流程图,包括以下步骤S1101~S1114。

[0145] 步骤S1101测量叶片的晶体取向角度。具体的,测量所需要设置应变片(传感器)的叶片的晶体取向角度,并建立叶片装配后的物理坐标系与材料坐标系。

[0146] 步骤S1102,建立有限元模态分析模型。具体的,获取物理坐标系与材料坐标系的角度偏差 α (第一坐标轴与第一材料坐标轴的角度偏差)、 β (第二坐标轴与第二材料坐标轴的角度偏差)与 γ (第三坐标轴与第三材料坐标轴的角度偏差),并根据 α 、 β 与 γ ,建立叶片有限元模态分析模型,得到不同工况不同阶次下的振动应力场以及固有频率。

[0147] 步骤S1103,绘制坎贝尔图。具体的,根据涡轮叶片在不同工况不同阶次下的固有频率,绘制Campbell图进行共振分析,通过分析得到不满足共振裕度设计要求的相应工况以及对应阶次(共振分析结果)。

[0148] 步骤S1104,计算无量纲相对振动应力场。具体的,将不满足共振裕度设计要求的相应工况以及对应阶次下的相对振动应力场除以该阶次下最大的相对振动应力,得到该阶次下无量纲的相对振动应力场(第一振动应力场)。

[0149] 步骤S1105,建立有限元静强度模型。具体的,建立涡轮叶片在该工况下的有限元静强度分析模型,通过有限元静强度分析模型计算得到叶片在发生共振时的承受振动载荷属性。

[0150] 步骤S1106,计算许用振动应力场。具体的,根据有限元静强度分析结果,由Goodman曲线得到在该叶片的许用振动应力场。

[0151] 步骤S1107,确定危险点。具体的将许用应力场(第二振动应力场)除以无量纲的相对振动应力场(第一振动应力场),得到振动强度储备最小的位置为振动的危险点(实际测量位置)。

[0152] 步骤S1108,结合叶片形状分析。具体的,由于叶片存在大量的气膜孔,而且危险点(实际测量位置)大多分布在气膜孔以及叶根倒角处这些处于多轴应力状态的部位,因此在这些部位上选择VonMises应力作为考核应力(等效应力),并记为 $\sigma_{\max, model}$ 。

[0153] 步骤S1109,确定测点。具体的,确定测点(实际测量位置)的子步骤如下:

[0154] 1) 确定可贴片区域(多个候选测量位置),可贴片区域的要求为,该区域VonMises等效应力相对较大,与危险点(目标测量位置)的VonMises等效应力比值应大于20%,应力梯度小,在所选区域等效应力变化范围在5%左右,该区域不存在气膜孔以及倒角;

[0155] 2) 根据有限元模态分析模型的结果,将叶片振型分为以下三种:纯弯(包括一弯以

及二弯)、纯扭(包括一扭以及二扭)以及弯扭复合;

[0156] 3) 在叶片发生纯弯以及弯扭复合振型时的可贴片区域(候选测量位置)范围内取交集或者将发生纯扭以及弯扭复合振型时的可贴片区域(候选测量位置)范围内取交集作为可贴片区域,以实现设置一个应变片(传感器)能够测量多种工况下的振动应力大小的目的。最后在可贴片区域处选择VonMises(等效应力)较大的节点为测点(实际测量位置)。

[0157] 步骤S1110,确定贴片方向。具体的,确定贴片方向(测量方向)的子步骤如下:

[0158] 1) 以测点(实际测量位置)为坐标原点建立笛卡尔直角坐标系,其中叶高方向取为Z轴,轴向取为X轴,周向为Y轴;

[0159] 2) 读取测点(实际测量位置)以及叶片表面测点周围节点(除实际测量位置之外的其他位置)在笛卡尔坐标系下的坐标,用周围点的坐标减去测点的坐标,从而建立不同方向的方向矢量[hk1](候选方向矢量);

[0160] 计算出[hk1]方向(候选方向矢量)与三个坐标轴夹角的余弦 $\cos x, \cos y, \cos z$,并令三个余弦值分别 a, b, c ;

[0161] 将测点(实际测量位置)的应力分量带入弹性力学斜截面正应力计算公式,计算得到沿不同[hk1]方向(候选方向矢量)的正应力,其中, σ_n 为正应力, σ_x 为x轴方向的应力分量, σ_y 为y轴方向的应力分量, σ_z 为z轴方向的应力分量, σ_{xy} 为x轴与y轴平分线方向的应力分量, σ_{yz} 为y轴与z轴平分线方向的应力分量, σ_{xz} 为x轴与z轴平分线方向的应力分量。

$$[0162] \quad \sigma_n = \sigma_x a^2 + \sigma_y b^2 + \sigma_z c^2 + 2\sigma_{xy} ab + 2\sigma_{yz} bc + 2\sigma_{xz} ac$$

[0163] 选择正应力最大的方向为贴片方向(测量方向)。

[0164] 步骤S1111,计算传感器的敏感度参数。具体公式如下,其中, σ_n 为测点(实际测量点)的正应力, $\sigma_{\max, \text{model}}$ 为危险点(理论测量位置)的等效应力, θ 为敏感度参数。

$$[0165] \quad \theta = \frac{\sigma_n}{\sigma_{\max, \text{model}}}$$

[0166] 步骤S1112,确定测点(实际测量位置)是否满足预设条件,若不满足则返回步骤S1109,若满足则进行应变计贴片(设置传感器)测量振动应变 ε 并继续步骤S1113。其中,预设条件为该测点处的应变计敏感度是否满足 $\theta \geq 20\%$ 。

[0167] 步骤S1113,计算贴片方向(测量方向)的弹性模量参数,其子步骤如下:

[0168] 1) 读取测点(实际测量位置)的温度值T(当前温度),当测点温度值介于 T_1, T_2 (第一温度与第二温度)之间,分别对[111]和[001]方向的弹性模量参数进行分段线性温度插值,得到测点在该温度下沿两个方向的弹性模量参数 $E_{[111]}$ 和 $E_{[001]}$ 。插值公式如下,其中, $E_{1[111]}$ 为 T_1 温度下,沿着[111]方向的弹性模量参数, $E_{2[111]}$ 为 T_2 温度下,沿着[111]方向的弹性模量参数, $E_{1[001]}$ 为 T_1 温度下,沿着[001]方向的弹性模量参数, $E_{2[001]}$ 为 T_2 温度下,沿着[001]方向的弹性模量参数。

$$[0169] \quad E_{[111]} = E_{1[111]} + \frac{E_{2[111]} - E_{1[111]}}{T_2 - T_1} (T - T_1)$$

$$[0170] \quad E_{[001]} = E_{1[001]} + \frac{E_{2[001]} - E_{1[001]}}{T_2 - T_1} (T - T_1)$$

[0171] 计算[hkl] (笛卡尔方向矢量) 在材料坐标系的方向矢量[HKL] (材料方向矢量), 其中, α 、 β 与 γ 为笛卡尔坐标系与材料坐标系的角度偏差。

$$[0172] \quad \begin{bmatrix} H \\ K \\ L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha & 0 \\ -\sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\beta & 0 & \cos\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\gamma & \sin\gamma & 0 \\ -\sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h \\ k \\ l \end{bmatrix}$$

[0173] 计算弹性模量参数, 公式如下。其中, $E_{[hkl]}$ 为弹性模量参数, [HKL] 为测量方向在材料坐标系中的方向矢量, $E_{[111]}$ 为沿着[111]方向的弹性模量参数, $E_{[001]}$ 为沿着[001]方向的弹性模量参数。

$$[0174] \quad \frac{1}{E_{[hkl]}} = \frac{1}{E_{[001]}} + 3 \times \frac{H^2K^2 + H^2L^2 + K^2L^2}{\sqrt{H^2 + K^2 + L^2}} \times \left(\frac{1}{E_{[111]}} - \frac{1}{E_{[001]}} \right)$$

[0175] 步骤S1114, 计算并输出危险点 (理论测量位置) 的振动应力, 公式如下。其中, σ 为理论测量位置的振动应力, ε 为实际测量位置的应变, $E_{[hkl]}$ 为沿着测量方向的弹性模量参数, θ 为传感器的敏感度参数

$$[0176] \quad \sigma = \frac{\varepsilon \times E_{[hkl]}}{\theta}$$

[0177] 在本公开示例实施方式所提供的振动应力测量方法中, 获取传感器的敏感度参数, 根据叶片对应的晶体取向角度确定叶片沿着测量方向的弹性模量参数, 在传感器位于实际测量位置且位于测量方向时, 通过传感器获取实际测量位置的应变, 通过应变、弹性模量参数与敏感度参数计算理论测量位置的应力。一方面, 考虑到晶体取向角度对弹性模量参数的影响, 根据晶体取向角度确定弹性模量参数, 并将弹性模量参数加入到最终振动应力的计算过程中, 减少了因晶体取向引起的弹性模量参数误差而导致的测量结果误差, 提高了测量准确性; 另一方面, 由于在计算各应力场均考虑了晶体取向的作用, 因此考虑晶体取向对敏感度参数的影响从而使得敏感度的准确性得到保证; 再一方面, 考虑到温度、稳态应力、以及相对振动应力三方面因素, 能够准确找出理论测量位置, 具有更多的现实参考意义。

[0178] 图12是根据一示例性实施例示出的一种振动应力测量装置框图。参照图12, 该振动应力测量装置1200包括第一参数获取模块1210, 第二参数获取模块1220, 第三参数获取模块1230, 计算模块1240。其中:

[0179] 第一参数获取模块1210用于获取传感器的敏感度参数; 第二参数获取模块1220用于根据叶片对应的晶体取向角度确定叶片沿着测量方向的弹性模量参数; 第三参数获取模块1230用于在传感器位于实际测量位置且位于测量方向时, 通过传感器获取实际测量位置的应变; 计算模块1240用于通过应变、弹性模量参数与敏感度参数计算理论测量位置的应力。

[0180] 在本公开的一种示例性实施例中, 基于前述方案, 装置还包括: 第一振动应力场计算单元, 用于根据共振分析结果计算第一振动应力场; 第二振动应力场计算单元, 用于根据叶片的承受载荷属性计算第二振动应力场; 理论测量位置确定单元, 用于根据第一振动应力场与第二振动应力场在叶片上确定理论测量位置。

[0181] 在本公开的一种示例性实施例中, 基于前述方案, 据理论测量位置确定实际测量

位置,装置还包括:等效应力计算单元,用于计算理论测量位置的等效应力;第一实际测量位置确定单元,用于根据等效应力确定实际测量位置。

[0182] 在本公开的一种示例性实施例中,基于前述方案,据等效应力确定实际测量位置,装置还包括:候选测量位置确定单元,用于根据等效应力确定多个满足预设条件的候选测量位置;第二实际测量位置确定单元,用于在多个候选测量位置中确定正应力最大的实际测量位置。

[0183] 在本公开的一种示例性实施例中,基于前述方案,根据共振分析结果计算第一振动应力场,装置还包括:第一坐标系建立单元,用于建立笛卡尔坐标系;第二坐标系建立单元,用于获取晶体的枝晶干,并根据枝晶干确定第一材料坐标轴、第二材料坐标轴与第三材料坐标轴,以使得根据第一材料坐标轴、第二材料坐标轴与第三材料坐标轴建立材料坐标系;角度偏差参数获取单元,用于获取笛卡尔坐标系与材料坐标系的角度偏差参数;共振分析单元,用于通过角度偏差参数对叶片进行共振分析得到共振分析结果。

[0184] 在本公开的一种示例性实施例中,基于前述方案,装置还包括:应力分量测量单元,用于获取实际测量位置的应力分量;候选方向矢量获取单元,用于根据实际测量位置与叶片上除实际测量位置之外的其他位置确定多个候选方向矢量;目标方向矢量确定单元,用于根据应力分量计算叶片表面沿着各候选方向矢量上的正应力,确定正应力最大的候选方向矢量为目标方向矢量。

[0185] 在本公开的一种示例性实施例中,基于前述方案,根据叶片对应的晶体取向角度确定叶片沿着测量方向的弹性模量参数,装置还包括:第一坐标系建立单元,用于在叶片上建立笛卡尔坐标系,并确定测量方向在笛卡尔坐标系的笛卡尔方向矢量;第二坐标系建立单元,用于获取晶体的枝晶干,并根据枝晶干确定第一材料坐标轴、第二材料坐标轴与第三材料坐标轴,以使得根据第一材料坐标轴、第二材料坐标轴与第三材料坐标轴建立材料坐标系;测温单元,用于获取实际测量位置的当前温度;弹性模量参数获取单元,用于获取实际测量位置的第一弹性模量参数与第二弹性模量参数;矢量计算单元,用于根据笛卡尔方向矢量计算材料方向矢量;弹性模量参数计算单元,用于根据当前温度、第一弹性模量参数、第二弹性模量参数与材料方向矢量计算弹性模量参数。

[0186] 在本公开示例实施方式所提供的振动应力测量装置,获取传感器的敏感度参数,根据叶片对应的晶体取向角度确定叶片沿着测量方向的弹性模量参数,在传感器位于实际测量位置且位于测量方向时,通过传感器获取实际测量位置的应变,通过应变、弹性模量参数与敏感度参数计算理论测量位置的应力。一方面,考虑到晶体取向角度对弹性模量参数的影响,根据晶体取向角度确定弹性模量参数,并将弹性模量参数加入到最终振动应力的计算过程中,减少了因晶体取向引起的弹性模量参数误差而导致的测量结果误差,提高了测量准确性;另一方面,由于在计算各应力场均考虑了晶体取向的作用,因此考虑晶体取向对敏感度参数的影响从而使得敏感度的准确性得到保证;再一方面,考虑到温度、稳态应力、以及相对振动应力三方面因素,能够准确找出理论测量位置,具有更多的现实参考意义。

[0187] 由于本公开的示例实施例的振动应力测量生成装置的各个功能模块与上述振动应力测量生成方法的示例实施例的步骤对应,因此对于本公开装置实施例中未披露的细节,请参照本公开上述的振动应力测量生成方法的实施例。

[0188] 应当注意,尽管在上文详细描述中提及了用于动作执行的设备的若干模块或者单元,但是这种划分并非强制性的。实际上,根据本公开的实施方式,上文描述的两个或更多模块或者单元的特征和功能可以在一个模块或者单元中具体化。反之,上文描述的一个模块或者单元的特征和功能可以进一步划分为由多个模块或者单元来具体化。

[0189] 图13示出了适于用来实现本公开实施例的电子设备的计算机系统的结构示意图。

[0190] 需要说明的是,图13示出的电子设备的计算机系统1300仅是一个示例,不应对本公开实施例的功能和使用范围带来任何限制。

[0191] 如图13所示,计算机系统1300包括中央处理单元(CPU)1301,其可以根据存储在只读存储器(ROM)1302中的程序或者从存储部分1308加载到随机访问存储器(RAM)1303中的程序而执行各种适当的动作和处理。在RAM1303中,还存储有系统操作所需的各种程序和数据。CPU1301、ROM1302以及RAM1303通过总线1304彼此相连。I/O接口1305也连接至总线1304。

[0192] 以下部件连接至I/O接口1305:包括键盘、鼠标等的输入部分1306;包括诸如阴极射线管(CRT)、液晶显示器(LCD)等以及扬声器等的输出部分1307;包括硬盘等的存储部分1308;以及包括诸如LAN卡、调制解调器等的网络接口卡的通信部分1309。通信部分1309经由诸如因特网的网络执行通信处理。驱动器1310也根据需要连接至I/O接口1305。可拆卸介质1311,诸如磁盘、光盘、磁光盘、半导体存储器等等,根据需要安装在驱动器1310上,以便于从其上读出的计算机程序根据需要被安装入存储部分1308。

[0193] 特别地,根据本公开的实施例,下文参考流程图描述的过程可以被实现为计算机软件程序。例如,本公开的实施例包括一种计算机程序产品,其包括承载在计算机可读介质上的计算机程序,该计算机程序包含用于执行流程图所示的方法的程序代码。在这样的实施例中,该计算机程序可以通过通信部分1309从网络上被下载和安装,和/或从可拆卸介质1311被安装。在该计算机程序被中央处理单元(CPU)1301执行时,执行本申请的方法和装置中限定的各种功能。例如,可以执行如图2中所示的步骤S210,获取传感器的敏感度参数;其中,敏感度参数用于指示叶片上理论测量位置与实际测量位置在相同外因下所受应力的比例关系,理论测量位置为叶片受振动影响最大的位置,根据理论测量位置确定实际测量位置;步骤S220,根据叶片对应的晶体取向角度确定叶片沿着测量方向的弹性模量参数;其中,测量方向为实际测量位置正应力最大的方向;步骤S230,在传感器位于实际测量位置且位于测量方向时,通过传感器获取实际测量位置的应变;其中,应变用于指示叶片在外载荷作用下外形的相对变化,外载荷为应力与受力面积的乘积,应力为叶片内部相互作用的内力;步骤S240,通过应变、弹性模量参数与敏感度参数计算理论测量位置的应力。

[0194] 在本公开的示例性实施例中,还提供了一种计算机可读存储介质,其上存储有能够实现本说明书上述方法的程序产品。在一些可能的实施方式中,本公开的各个方面还可以实现为一种程序产品的形式,其中包括程序代码,当程序产品在终端上运行时,程序代码用于使终端设备执行本说明书上述“示例性方法”部分中描述的根据本公开各种示例性实施方式和步骤。

[0195] 根据本公开的实施方式的用于实现上述方法的程序产品,其可以采用便携式紧凑盘只读存储器(CD-ROM)并包括程序代码,并可以在终端设备,例如个人电脑上运行。然而,本公开的程序产品不限于此,可读存储介质可以是任何包含或存储程序的有型介质,该程

序可以被指令执行系统、装置或者器件使用或者与其结合使用。

[0196] 程序产品可以采用一个或多个可读介质任一组合。可读介质可以是可读信号介质或者可读存储介质。可读介质例如可以为但不限于电、磁、光、电磁、红外线、或半导体的系统、装置或器件,或者任意以上组合。可读存储介质的更具体例子(非穷举的列表)包括:具有一个或多个导线的电连接、便携式盘、硬盘、随机存取存储器(RAM)、只读存储器(ROM)、可擦式可编程只读存储器(EPROM或闪存)、光纤、便携式紧凑盘只读存储器(CD-ROM)、光存储器件、磁存储器件、或者上述的任意合适组合。

[0197] 计算机可读信号介质可以包括在基带中或者作为载波的一部分传播的数据信号,其中承载了可读程序代码。这种传播的数据信号可以此采用多种形式,包括但不限于电磁信号、光信号或上述任意的合适的组合。可读信号介质还可以是可读存储介质以外的任何可读质,该可读介质可以发送、传播或者传输用于由指令执行系统、装置或者器件使用或者与其结合使用的程序。

[0198] 可读介质包含的程序代码可以用于任何适当的介质传输,包括但不限于无线、有线、光缆、RF等待,或者上述任意合适的组合。

[0199] 此外,上述附图仅是根据本公开示例性实施例的方法所包括的处理的示意性说明,而不是限制目的。易于理解,上述附图所示的处理并不表明或限制这些处理的时间顺序。另外,也易于理解,这些处理可以是例如在多个模块中同步或异步执行的。

[0200] 本领域技术人员在考虑说明书及实践这里公开的发明后,很容易想到本公开的其他实施例。本申请旨在涵盖本公开的任何变型、用途或者适应性变化,这些变型、用途、或者适应性变化遵循本公开的一般性原理并包括本公开未公开的本技术领域中的公知常识或者惯用技术手段。说明书和实施例仅被视为示例性的,本公开的真正范围和精神由权利要求指出。

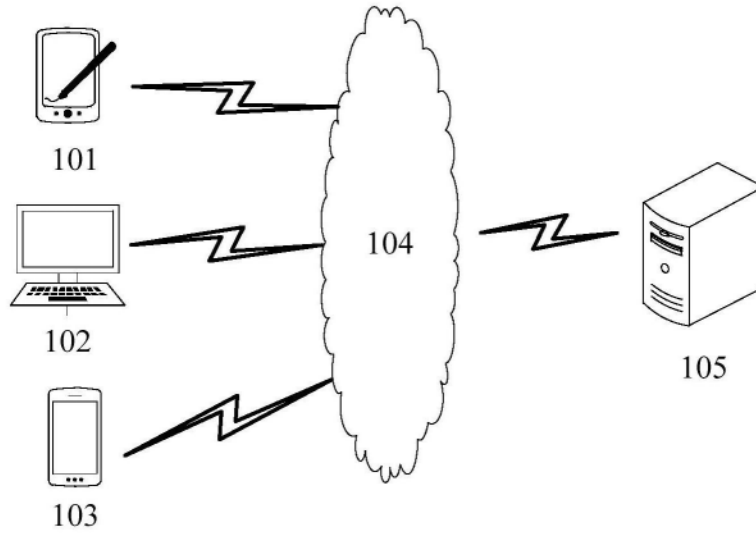


图1

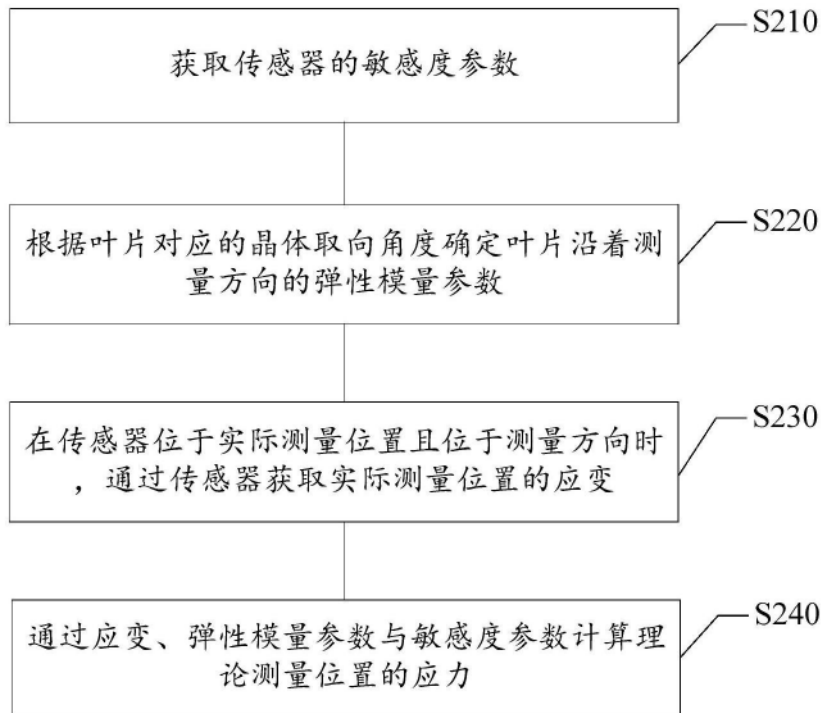


图2



图3

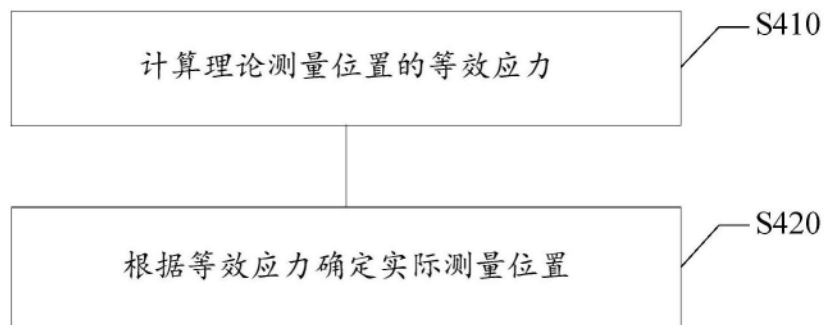


图4

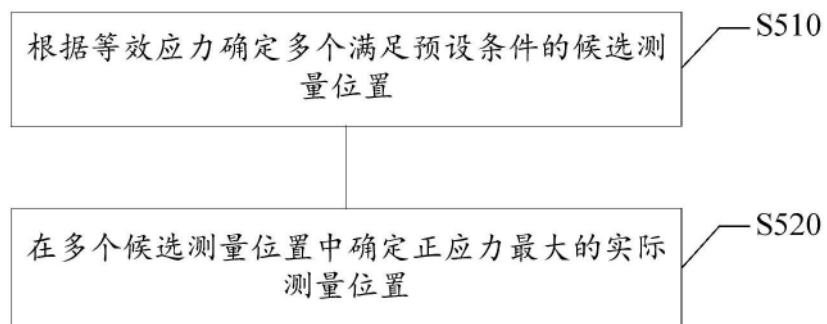


图5

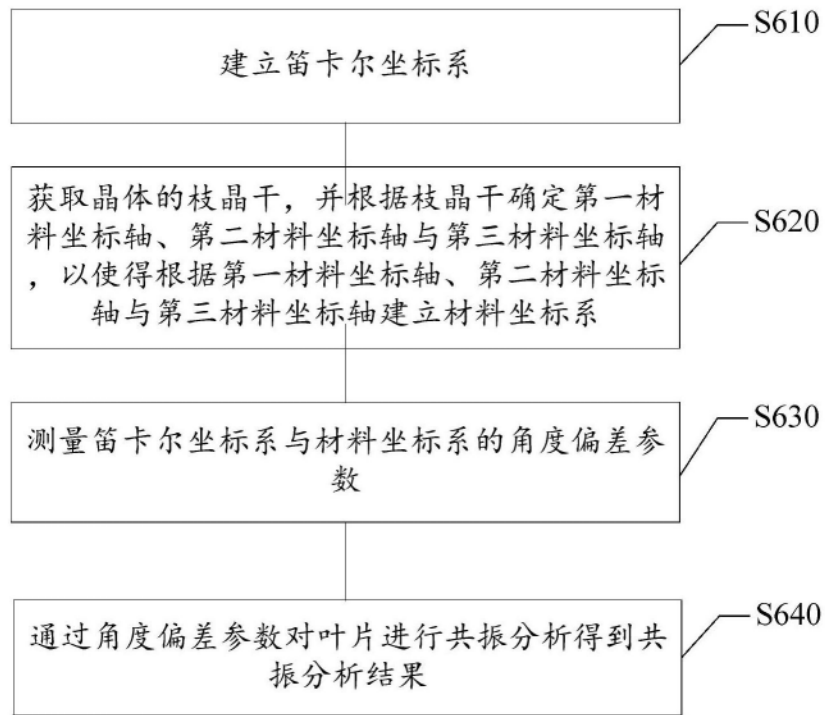


图6

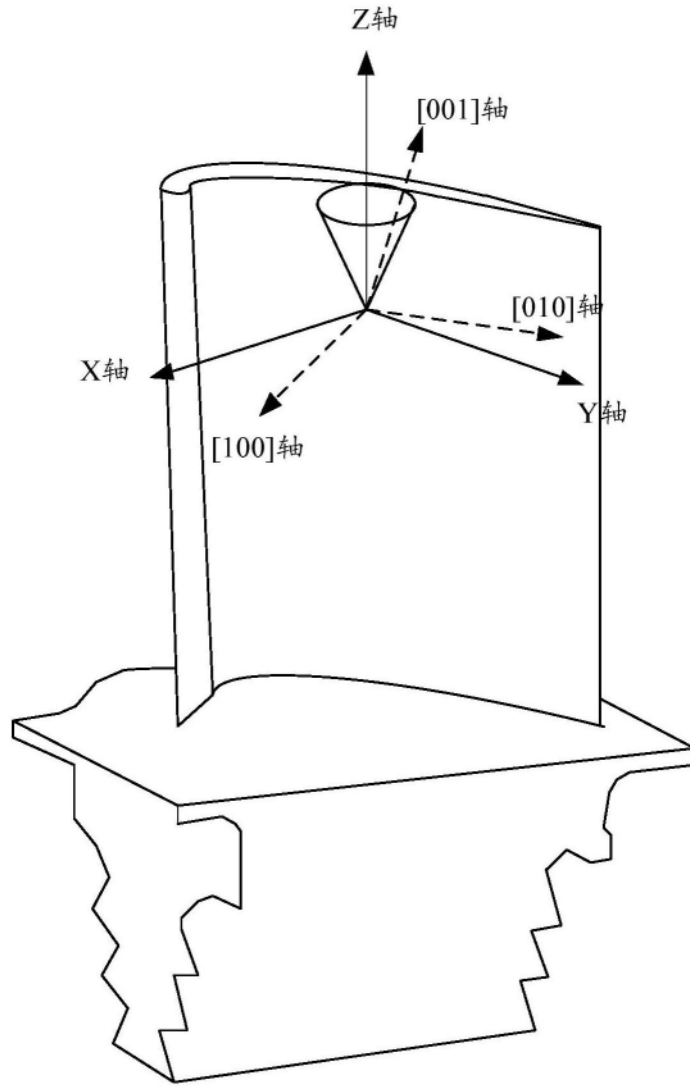


图7

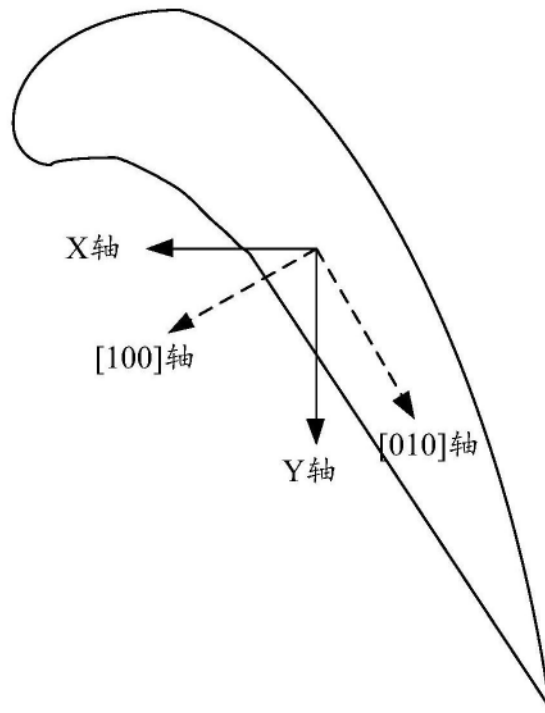


图8

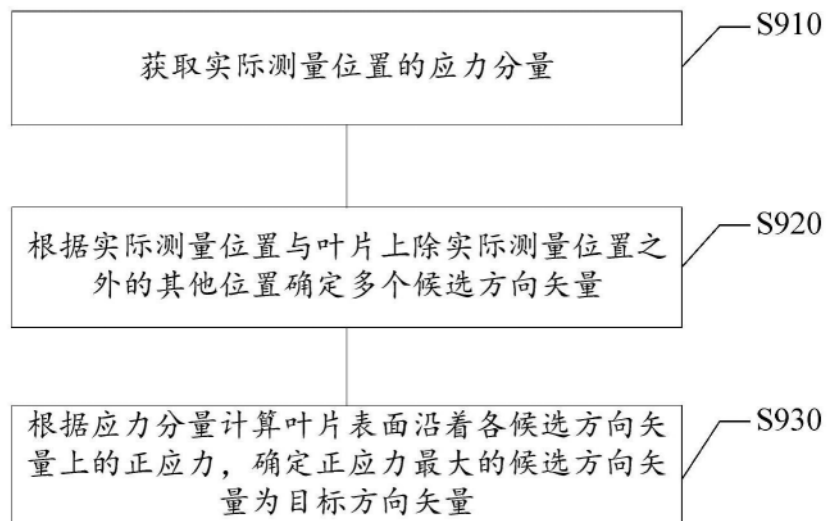


图9

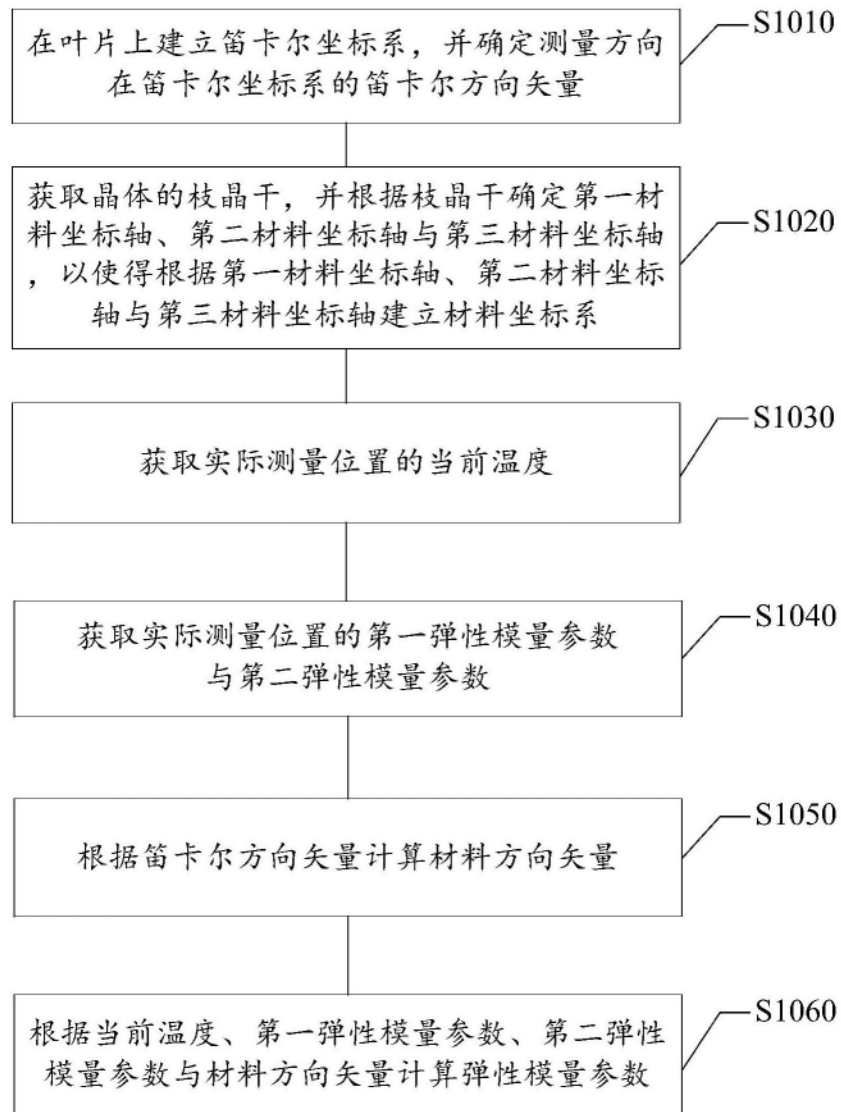


图10

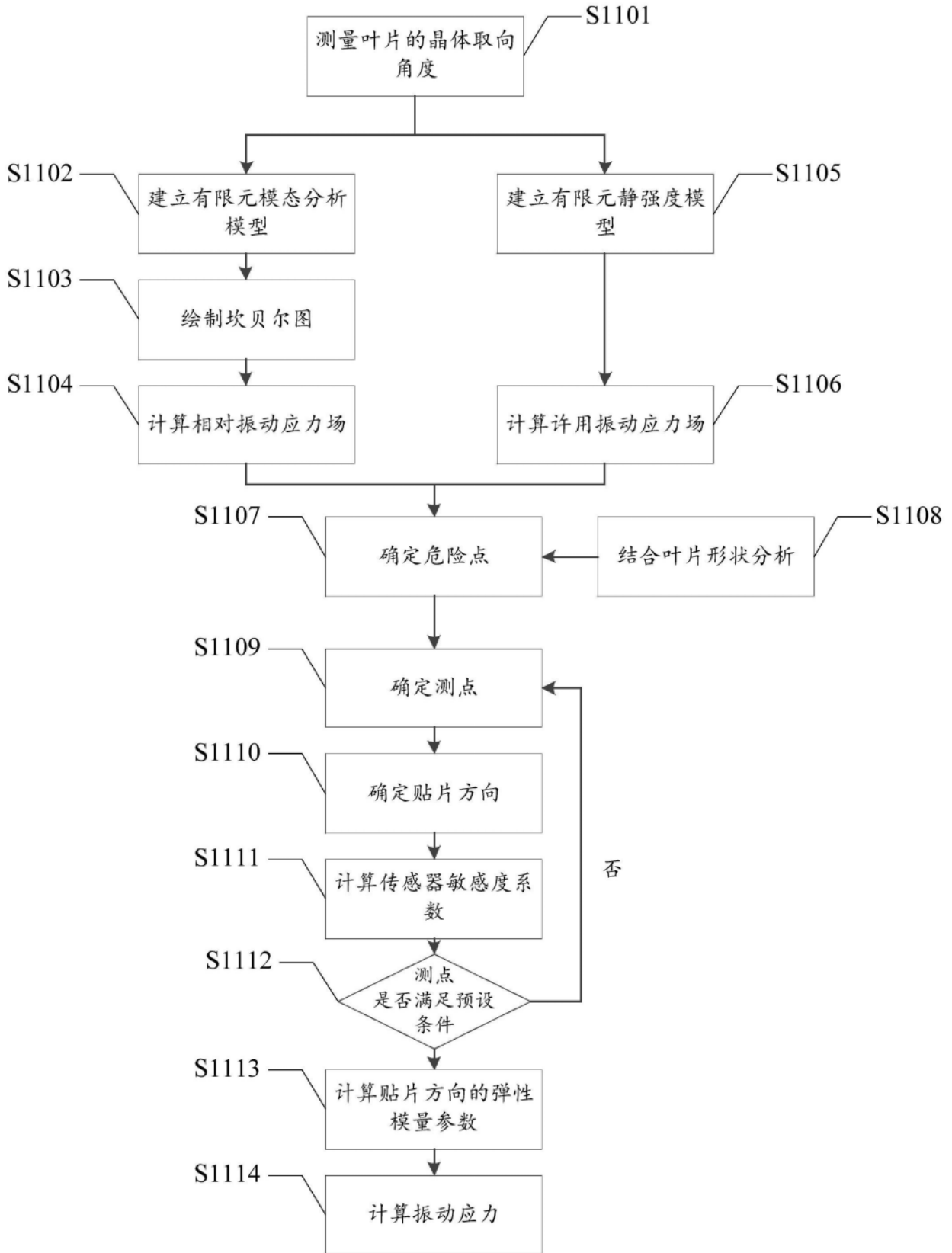


图11

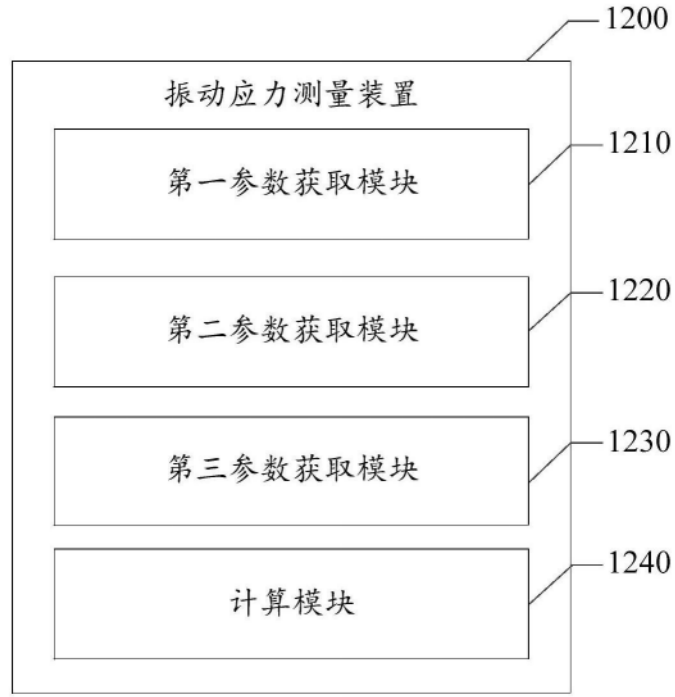


图12

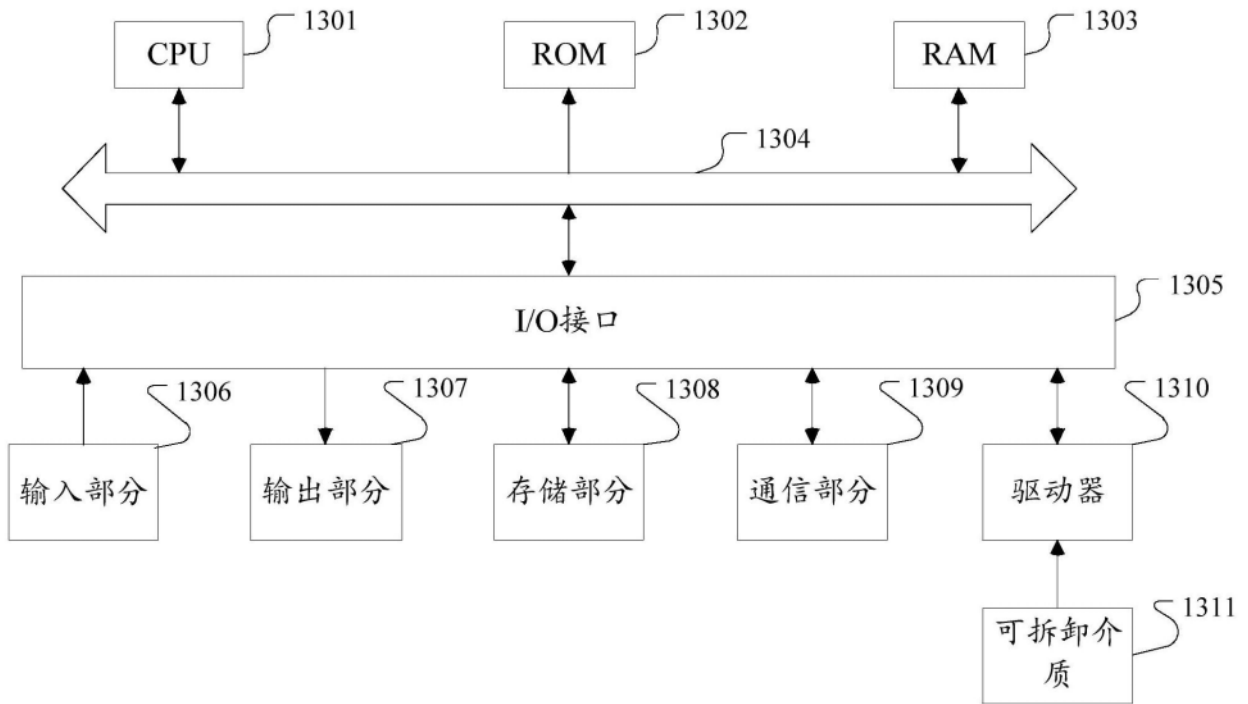


图13