



# (12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 115587490 A

(43) 申请公布日 2023. 01. 10

(21) 申请号 202211281697.5

(22) 申请日 2022.10.19

(71) 申请人 中国航发沈阳发动机研究所  
地址 110015 辽宁省沈阳市沈河区万莲路1号

(72) 发明人 赵耘墨 邓明春 范宇 周建军  
赵家军 李鑫 余毅

(74) 专利代理机构 北京航信高科知识产权代理  
事务所(普通合伙) 11526  
专利代理师 王伟立

(51) Int. Cl.  
G06F 30/20 (2020.01)  
G06F 30/17 (2020.01)  
G06F 119/08 (2020.01)

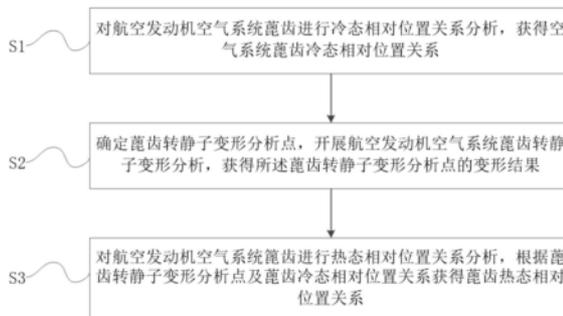
权利要求书2页 说明书5页 附图2页

## (54) 发明名称

一种航空发动机空气系统篦齿热态相对位置关系分析方法

## (57) 摘要

本申请提供了一种航空发动机空气系统篦齿热态相对位置关系分析方法,包括:步骤一、对航空发动机空气系统篦齿进行冷态相对位置关系分析,获得空气系统篦齿冷态相对位置关系;步骤二、确定篦齿转静子变形分析点,开展航空发动机空气系统篦齿转静子变形分析,获得所述篦齿转静子变形分析点的变形结果;步骤三、对航空发动机空气系统篦齿进行热态相对位置关系分析,根据篦齿转静子变形分析点及篦齿冷态相对位置关系获得篦齿热态相对位置关系。本申请提供的方法不仅考虑了篦齿径向和轴向变形对篦齿热态相对位置关系的影响,在发动机试车前预测篦齿热态相对位置关系,进而预测由于篦齿热态间隙过大或过小可能产生的故障,可获得较高的分析精度。



1. 一种航空发动机空气系统篦齿热态相对位置关系分析方法,其特征在于,包括:

步骤一、对航空发动机空气系统篦齿进行冷态相对位置关系分析,获得空气系统篦齿冷态相对位置关系;

步骤二、确定篦齿转静子变形分析点,开展航空发动机空气系统篦齿转静子变形分析,获得所述篦齿转静子变形分析点的变形结果;

步骤三、对航空发动机空气系统篦齿进行热态相对位置关系分析,根据篦齿转静子变形分析点及篦齿冷态相对位置关系获得篦齿热态相对位置关系。

2. 如权利要求1所述的航空发动机空气系统篦齿热态相对位置关系分析方法,其特征在于,所述空气系统篦齿冷态相对位置关系,包括:

1) 参数A1,表示蜂窝所在部件平面前端距蜂窝前端距离的负值;

2) 参数H,表示蜂窝厚度;

3) 参数L,表示蜂窝所在部件平面前端和后端的距离;

4) 参数h,表示篦齿和蜂窝的冷态径向间隙距离,由篦齿盘的齿顶直径 $d_{\text{转}}$ 和对应蜂窝的内径 $d_{\text{静}}$ ,以公式 $h = (d_{\text{静}} - d_{\text{转}}) / 2$ 计算获得;

5) 参数l,表示蜂窝长度;

6) 参数a1,表示第1个篦齿齿尖距蜂窝前端距离;

7) 参数an,表示第n个篦齿齿尖距蜂窝前端距离。

3. 如权利要求1或2所述的航空发动机空气系统篦齿热态相对位置关系分析方法,其特征在于,所述篦齿转静子变形分析点包括:

篦齿齿尖前端构成的转子变形分析点;以及

蜂窝所在平面前后两 endpoint 构成的静子变形分析点。

4. 如权利要求3所述的航空发动机空气系统篦齿热态相对位置关系分析方法,其特征在于,所述蜂窝所在平面前端变形分析点E1的轴向变形量为 $\Delta qz$ ,径向变形量为 $\Delta qj$ ;

蜂窝所在平面前端变形分析点E2的轴向变形量为 $\Delta hz$ ,径向变形量为 $\Delta hj$ ;

第一个篦齿齿尖前 endpoint e1 轴向变形量 $\Delta e1z$ ,径向变形量 $\Delta e1j$ ;

第n个篦齿齿尖前 endpoint en 轴向变形量 $\Delta enz$ ,径向变形量 $\Delta enj$ 。

5. 如权利要求4所述的航空发动机空气系统篦齿热态相对位置关系分析方法,其特征在于,空气系统篦齿热态相对位置根据如下因素确定:

1) 参数 $\Delta qz$ ,表示蜂窝所在部件平面前端轴向变形量;

2) 参数 $\Delta qj$ ,表示蜂窝所在部件平面前端径向变形量;

3) 参数 $\Delta hz$ ,表示蜂窝所在部件平面后端轴向变形量;

4) 参数 $\Delta hj$ ,表示蜂窝所在部件平面后端径向变形量;

5) 参数 $\Delta a1z$ ,表示第1个篦齿齿尖轴向变形量;

6) 参数 $\Delta a1j$ ,表示第1个篦齿齿尖径向变形量;

7) 参数 $\Delta anj$ ,表示第n个篦齿齿尖径向变形量。

6. 如权利要求5所述的航空发动机空气系统篦齿热态相对位置关系分析方法,其特征在于,所述篦齿热态相对位置关系包括:

篦齿热态下蜂窝平面旋转角度、蜂窝平面前 endpoint 在热态相对坐标系中的坐标、蜂窝平面在热态相对坐标系中的位置以及篦齿各齿尖在热态相对坐标系中坐标。

7. 如权利要求8所述的航空发动机空气系统篦齿热态相对位置关系分析方法,其特征  
在于,所述篦齿热态下蜂窝平面旋转角度通过如下过程得到:

将空气系统篦齿静子变形分析点的变形量代入热态相对坐标系中,得到蜂窝所在部件  
平面前端点坐标  $(A1 + \Delta qz, H + h + \Delta qj)$  和蜂窝所在部件平面后端点坐标  $(A1 + L + \Delta hz, H + h + \Delta hj)$ ,

以蜂窝所在部件平面前后端点坐标确定蜂窝所在部件平面热态工况下相对冷态平面的  
旋转角度 $\theta$ ,所述旋转角度 $\theta$ 即蜂窝平面旋转角度。

8. 如权利要求7所述的航空发动机空气系统篦齿热态相对位置关系分析方法,其特征  
在于,所述蜂窝平面前端点在热态相对坐标系中的坐标为  $(x1, y1) = (A1 + \Delta qz + H \cdot \sin\theta - A1 \cdot \cos\theta, H + h + \Delta qj - H \cdot \cos\theta - A1 \cdot \sin\theta)$ 。

9. 如权利要求8所述的航空发动机空气系统篦齿热态相对位置关系分析方法,其特征  
在于,所述蜂窝平面在热态相对坐标系中的位置确定过程如下:

根据蜂窝平面前端点在热态相对坐标系中的坐标和以旋转角度确定的斜率  $k = \tan\theta$ ,  
进而确定蜂窝平面在相对坐标系中所直线为  $y = y1 - \tan\theta \cdot x1$ 。

10. 如权利要求9所述的航空发动机空气系统篦齿热态相对位置关系分析方法,其特征  
在于,所示篦齿各齿尖在热态相对坐标系中坐标包括:

第1个篦齿齿尖坐标为  $(a1 + \Delta a1z, \Delta a1j)$ , 第n个篦齿齿尖坐标为  $(an + \Delta anz, \Delta anj)$ 。

## 一种航空发动机空气系统篦齿热态相对位置关系分析方法

### 技术领域

[0001] 本申请属于航空发动机技术领域,特别涉及一种航空发动机空气系统篦齿热态相对位置关系分析方法。

### 背景技术

[0002] 航空发动机空气系统的作用是保证航空发动机在工作状态具有合适的内部工作环境,是保障发动机安全运行的重要系统。篦齿结构是航空发动机空气系统常用的结构形式。在发动机工作状态,篦齿热态相对位置关系受多种因素影响且会随发动机工作状态不断变化,使得篦齿热态间隙不断变化。空气系统篦齿热态间隙过大会造成较大的气体泄漏,降低封严效果;篦齿热态间隙过小会导致篦齿转静子件磨损,严重时导致抱轴等故障。因此,准确的分析航空发动机空气系统篦齿热态相对位置关系,是分析空气系统各项功能实现,保障发动机安全运行的关键因素。

[0003] 现有的篦齿热态相对位置关系分析方法主要有两种,一种是通过计算由热应力和离心载荷引起的篦齿转、静件的径向变形,在篦齿冷态间隙基础上加上相对变形量获得篦齿热态相对位置关系,然而该方法仅考虑了篦齿径向的变形,忽略了篦齿轴向变形的影响,分析结果准确度不足;另一种是在发动机试车时采用X光射线对篦齿蜂窝的轴向与径向相对位移进行测量,通过相应状态篦齿运动轨迹定位获得篦齿热态相对位置关系,然而该方法无法在发动机试车前预测篦齿热态相对位置关系以及由于篦齿热态间隙过大或过小可能产生的故障,且该分析方法成本较高。

### 发明内容

[0004] 本申请的目的是提供了一种航空发动机空气系统篦齿热态相对位置关系分析方法,以解决或减轻背景技术中的至少一个问题。

[0005] 本申请的技术方案是:一种航空发动机空气系统篦齿热态相对位置关系分析方法,包括:

[0006] 步骤一、对航空发动机空气系统篦齿进行冷态相对位置关系分析,获得空气系统篦齿冷态相对位置关系;

[0007] 步骤二、确定篦齿转静子变形分析点,开展航空发动机空气系统篦齿转静子变形分析,获得所述篦齿转静子变形分析点的变形结果;

[0008] 步骤三、对航空发动机空气系统篦齿进行热态相对位置关系分析,根据篦齿转静子变形分析点及篦齿冷态相对位置关系获得篦齿热态相对位置关系。

[0009] 进一步的,所述空气系统篦齿冷态相对位置关系,包括:

[0010] 1) 参数A1,表示蜂窝所在部件平面前端距蜂窝前端距离的负值;

[0011] 2) 参数H,表示蜂窝厚度;

[0012] 3) 参数L,表示蜂窝所在部件平面前端和后端的距离;

[0013] 4) 参数h,表示篦齿和蜂窝的冷态径向间隙距离,由篦齿盘的齿顶直径 $d_{\text{转}}$ 和对应蜂

窝的内径 $d_{\text{静}}$ ,以公式 $h = (d_{\text{静}} - d_{\text{转}}) / 2$ 计算获得;

[0014] 5) 参数 $l$ ,表示蜂窝长度;

[0015] 6) 参数 $a_1$ ,表示第1个篦齿齿尖距蜂窝前端距离;

[0016] 7) 参数 $a_n$ ,表示第 $n$ 个篦齿齿尖距蜂窝前端距离。

[0017] 进一步的,所述篦齿转静子变形分析点包括:

[0018] 篦齿齿尖前端构成的转子变形分析点;以及

[0019] 蜂窝所在平面前后两端点构成的静子变形分析点。

[0020] 进一步的,所述蜂窝所在平面前端变形分析点E1的轴向变形量为 $\Delta q_z$ ,径向变形量为 $\Delta q_j$ ;

[0021] 蜂窝所在平面前端变形分析点E2的轴向变形量为 $\Delta h_z$ ,径向变形量为 $\Delta h_j$ ;

[0022] 第一个篦齿齿尖前端口 $e_1$ 轴向变形量 $\Delta e_{1z}$ ,径向变形量 $\Delta e_{1j}$ ;

[0023] 第 $n$ 个篦齿齿尖前端口 $e_n$ 轴向变形量 $\Delta e_{nz}$ ,径向变形量 $\Delta e_{nj}$ 。

[0024] 进一步的,空气系统篦齿热态相对位置根据如下因素确定:

[0025] 1) 参数 $\Delta q_z$ ,表示蜂窝所在部件平面前端轴向变形量;

[0026] 2) 参数 $\Delta q_j$ ,表示蜂窝所在部件平面前端径向变形量;

[0027] 3) 参数 $\Delta h_z$ ,表示蜂窝所在部件平面后端轴向变形量;

[0028] 4) 参数 $\Delta h_j$ ,表示蜂窝所在部件平面后端径向变形量;

[0029] 5) 参数 $\Delta a_{1z}$ ,表示第1个篦齿齿尖轴向变形量;

[0030] 6) 参数 $\Delta a_{1j}$ ,表示第1个篦齿齿尖径向变形量;

[0031] 7) 参数 $\Delta a_{nj}$ ,表示第 $n$ 个篦齿齿尖径向变形量。

[0032] 进一步的,所述篦齿热态相对位置关系包括:

[0033] 篦齿热态下蜂窝平面旋转角度、蜂窝平面前端点在热态相对坐标系中的坐标、蜂窝平面在热态相对坐标系中的位置以及篦齿各齿尖在热态相对坐标系中坐标。

[0034] 进一步的,所述篦齿热态下蜂窝平面旋转角度通过如下过程得到:

[0035] 将空气系统篦齿静子变形分析点的变形量代入热态相对坐标系中,得到蜂窝所在部件平面前端口坐标 $(A_1 + \Delta q_z, H + h + \Delta q_j)$ 和蜂窝所在部件平面后端口坐标 $(A_1 + L + \Delta h_z, H + h + \Delta h_j)$ ,

[0036] 以蜂窝所在部件平面前后端口坐标确定蜂窝所在部件平面热态工况下相对冷态平面的旋转角度 $\theta$ ,所述旋转角度 $\theta$ 即蜂窝平面旋转角度。

[0037] 进一步的,所述蜂窝平面前端点在热态相对坐标系中的坐标为 $(x_1, y_1) = (A_1 + \Delta q_z + H \cdot \sin\theta - A_1 \cdot \cos\theta, H + h + \Delta q_j - H \cdot \cos\theta - A_1 \cdot \sin\theta)$ 。

[0038] 进一步的,所述蜂窝平面在热态相对坐标系中的位置确定过程如下:

[0039] 根据蜂窝平面前端点在热态相对坐标系中的坐标和以旋转角度确定的斜率 $k = \tan\theta$ ,进而确定蜂窝平面在相对坐标系中所直线为 $y = y_1 - \tan\theta \cdot x_1$ 。

[0040] 进一步的,所示篦齿各齿尖在热态相对坐标系中坐标包括:

[0041] 第1个篦齿齿尖坐标为 $(a_1 + \Delta a_{1z}, \Delta a_{1j})$ ,第 $n$ 个篦齿齿尖坐标为 $(a_n + \Delta a_{nz}, \Delta a_{nj})$ 。

[0042] 本申请提供的航空发动机空气系统篦齿热态相对位置关系分析方法不仅考虑了篦齿径向和轴向变形对篦齿热态相对位置关系的影响,在发动机试车前预测篦齿热态相对

位置关系,进而预测由于篦齿热态间隙过大或过小可能产生的故障,可获得高于现有技术  
的分析精度,同时相对于X光测量的方式,无需X光测量,可以以较低成本即可预测发动机试  
车中空气系统篦齿热态相对位置关系。

### 附图说明

[0043] 为了更清楚地说明本申请提供的技术方案,下面将对附图作简单地介绍。显而易  
见地,下面描述的附图仅仅是本申请的一些实施例。

[0044] 图1为本申请的篦齿热态相对位置关系分析流程示意图。

[0045] 图2为本申请一实施例的篦齿冷态相对位置关系示意图。

[0046] 图3为本申请一实施例的篦齿转静子变形分析点位置示意图。

[0047] 图4为本申请一实施例的篦齿热态相对位置关系示意图。

### 具体实施方式

[0048] 为使本申请实施的目的、技术方案和优点更加清楚,下面将结合本申请实施例中的  
附图,对本申请实施例中的技术方案进行更加详细的描述。

[0049] 如图1所示,本申请提供的航空发动机空气系统篦齿热态相对位置关系分析方法  
包括如下步骤:

[0050] 步骤一、对航空发动机空气系统篦齿进行冷态相对位置关系分析,获得篦齿冷态  
相对位置关系。

[0051] 如图2所示为本申请该实施例中提供的空气系统篦齿相对坐标系冷态示意图,根  
据该空气系统篦齿相对坐标系冷态示意图可以确定空气系统篦齿冷态相对位置关系,包  
括:

[0052] 1) 参数A1,表示蜂窝2所在部件平面前端距蜂窝前端距离的负值;

[0053] 在本申请提供的航空发动机应用实例中,可通过设计图纸或者发动机装配前实物  
测量获得。

[0054] 2) 参数H,表示蜂窝2厚度;

[0055] 在本申请提供的航空发动机应用实例中,可通过设计图纸或者发动机装配前实物  
测量获得。

[0056] 3) 参数L,表示蜂窝2所在部件平面前端和后端的距离;

[0057] 在本申请提供的航空发动机应用实例中,可通过设计图纸或者发动机装配前实物  
测量获得。

[0058] 4) 参数h,表示篦齿1和蜂窝2的冷态径向间隙距离,由篦齿盘的齿顶直径 $d_{\text{转}}$ 和对应  
蜂窝的内径 $d_{\text{静}}$ ,以公式 $h = (d_{\text{静}} - d_{\text{转}}) / 2$ 计算获得;

[0059] 在本申请提供的航空发动机应用实例中, $d_{\text{转}}$ 和 $d_{\text{静}}$ 可通过设计图纸或者发动机装配  
前实物测量获得。

[0060] 5) 参数l,表示蜂窝2长度;

[0061] 在本申请提供的航空发动机应用实例中,可通过设计图纸或者发动机装配前实物  
测量获得。

[0062] 6) 参数a1,表示第1个篦齿齿尖距蜂窝前端距离;

[0063] 在本申请提供的航空发动机应用实例中,可通过整机轴向尺寸链计算获得。

[0064] 7) 参数 $a_n$ ,表示第 $n$ 个篦齿齿尖距蜂窝前端距离;

[0065] 在本申请提供的航空发动机应用实例中,可通过整机轴向尺寸链计算获得。

[0066] 步骤二、开展航空发动机空气系统篦齿转静子变形分析

[0067] 如图3所示为本申请该实施例中提供的空气系统篦齿转静子变形分析示意图,其中:

[0068] 2.1) 确定篦齿转静子变形分析点,变形分析点在任何工况下都应容易识别并能够准确提取其变形量。

[0069] 在本申请提供的该航空发动机应用实例中,篦齿转子变形量分析点选取各齿尖前端,静子变形量分析点选取蜂窝所在平面前、后两端点,如图3所示。

[0070] 2.2) 空气系统特性分析为计算影响篦齿转/静子变形分析的温度场提供边界条件,其分析精度对于变形分析结果准确性有影响。

[0071] 在本申请提供的该航空发动机应用实例中,空气系统特性分析模型采取整机腔温腔压测试标定后的空气系统模型,能够较大幅度提高分析精度。

[0072] 2.3) 温度场分析为计算影响篦齿转/静子变形分析的热载荷提供边界条件,其分析精度对于变形分析结果准确性有影响。

[0073] 在本申请提供的该航空发动机应用实例中,温度场分析模型采取整机壁温测试标定后的热分析模型,能够较大幅度提高分析精度。

[0074] 2.4) 篦齿转/静子变形分析。

[0075] 可采用整机变形分析或者部件级变形分析进行篦齿转静子变形分析,通常整机变形分析获取的变形数据更准确。当采用部件级变形分析时,需统一所有转/静子轴向变形对应基准。

[0076] 在本申请提供的该航空发动机应用实例中,采用部件级变形分析,篦齿转/静子部件所有轴向变形都相对于中介机匣前端面。

[0077] 其中,图3中所示的各分析点变形分析结果如下:

[0078] 蜂窝2所在平面前端变形点E1轴向变形量 $\Delta q_z$ ,径向变形量 $\Delta q_j$ ;

[0079] 蜂窝2所在平面前端变形点E2轴向变形量 $\Delta h_z$ ,径向变形量 $\Delta h_j$ ;

[0080] 第一个篦齿齿尖前端点e1轴向变形量 $\Delta e_{1z}$ ,径向变形量 $\Delta e_{1j}$ ;

[0081] 第 $n$ 个篦齿齿尖前端点 $e_n$ 轴向变形量 $\Delta e_{nz}$ ,径向变形量 $\Delta e_{nj}$ 。

[0082] 步骤三、对空气系统篦齿热态相对位置关系分析,根据变形分析点及篦齿冷态相对位置关系获得篦齿热态相对位置关系。

[0083] 如图4所示的空气系统篦齿相对坐标系热态示意图,空气系统篦齿热态相对位置确定需考虑的因素包括:

[0084] 1) 参数 $\Delta q_z$ ,表示蜂窝所在部件平面前端轴向变形量;

[0085] 2) 参数 $\Delta q_j$ ,表示蜂窝所在部件平面前端径向变形量;

[0086] 3) 参数 $\Delta h_z$ ,表示蜂窝所在部件平面后端轴向变形量;

[0087] 4) 参数 $\Delta h_j$ ,表示蜂窝所在部件平面后端径向变形量;

[0088] 5) 参数 $\Delta a_{1z}$ ,表示第1个篦齿齿尖轴向变形量;

[0089] 6) 参数 $\Delta a_{1j}$ ,表示第1个篦齿齿尖径向变形量;

[0090] 7) 参数  $\Delta a_{nj}$ , 表示第  $n$  个篦齿齿尖径向变形量;

[0091] 上述参数可通过步骤二中的变形分析得到。

[0092] 根据变形分析点及篦齿冷态相对位置关系得到空气系统篦齿热态相对位置关系, 所述相对位置关系包括:

[0093] a) 篦齿热态下蜂窝平面旋转角度。

[0094] 将步骤二所得的空气系统篦齿静子变形量分析点的变形量代入上述坐标系, 可得图4所示蜂窝所在部件平面前端点坐标  $(A1 + \Delta qz, H+h + \Delta qj)$  和蜂窝所在部件平面后端点坐标  $(A1+L + \Delta hz, H+h + \Delta hj)$ 。

[0095] 以该两点坐标确定蜂窝所在部件平面热态工况下相对冷态平面的旋转角度  $\theta$ , 该角度  $\theta$  也是蜂窝平面旋转角度。

[0096] b) 蜂窝平面前端点在相对坐标系中坐标。

[0097] 在图4所示相对坐标系中用步骤一、二所得数据, 计算蜂窝平面前端点坐标, 该坐标为  $(x1, y1) = (A1 + \Delta qz + H \cdot \sin\theta - A1 \cdot \cos\theta, H+h + \Delta qj - H \cdot \cos\theta - A1 \cdot \sin\theta)$ 。

[0098] c) 蜂窝平面在相对坐标系中的位置。

[0099] 根据蜂窝平面前端点在相对坐标系中坐标和以旋转角度确定的斜率  $k = \tan\theta$  可以确定蜂窝平面在相对坐标系中所直线为  $y = kx = y1 - \tan\theta \cdot x1$ 。

[0100] d) 篦齿各齿尖在相对坐标系中坐标。

[0101] 将步骤二所得空气系统篦齿转子变形量分析点的变形量代入上述坐标系, 可得图4所示第1个篦齿齿尖坐标为  $(a1 + \Delta a1z, \Delta a1j)$ , 第  $n$  个篦齿齿尖坐标为  $(an + \Delta anz, \Delta anj)$ 。

[0102] 通过以上步骤, 获得了图4所示的空气系统篦齿热态相对位置关系。

[0103] 本申请提供的航空发动机空气系统篦齿热态相对位置关系分析方法不仅考虑了篦齿径向和轴向变形对篦齿热态相对位置关系的影响, 在发动机试车前预测篦齿热态相对位置关系, 进而预测由于篦齿热态间隙过大或过小可能产生的故障, 可获得高于现有技术的分析精度, 同时相对于X光测量的方式, 无需X光测量, 可以以较低成本即可预测发动机试车中空气系统篦齿热态相对位置关系。

[0104] 以上所述, 仅为本申请的具体实施方式, 但本申请的保护范围并不局限于此, 任何熟悉本技术领域的技术人员在本申请揭露的技术范围内, 可轻易想到的变化或替换, 都应涵盖在本申请的保护范围之内。因此, 本申请的保护范围应以所述权利要求的保护范围为准。

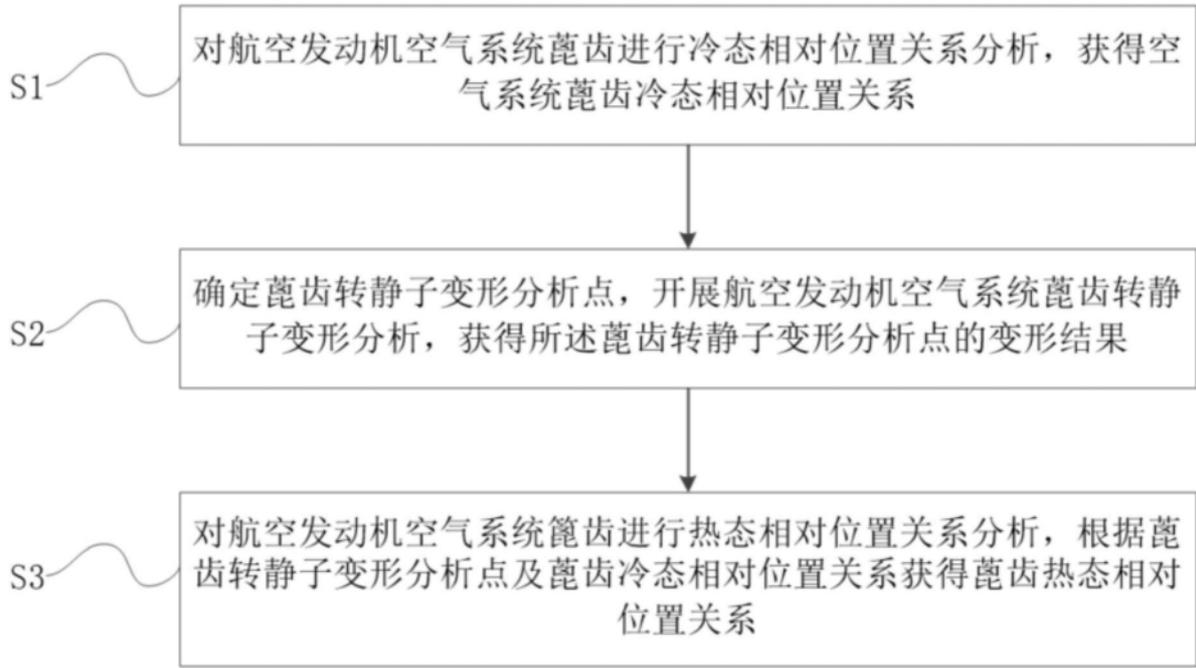


图1

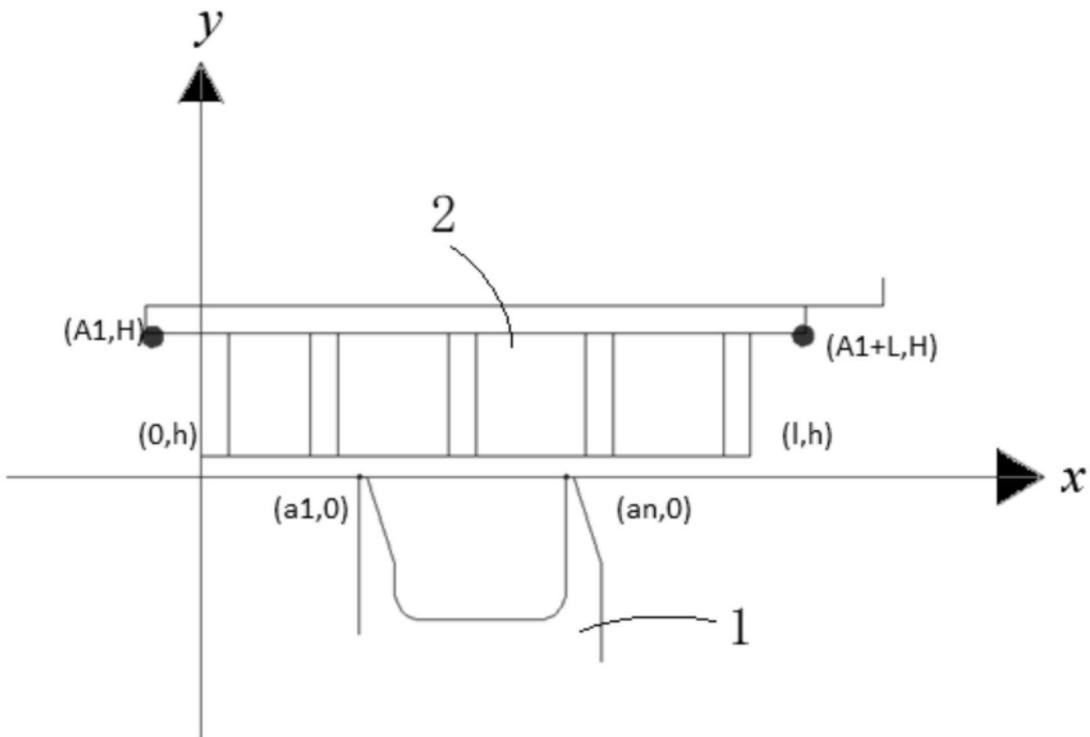


图2

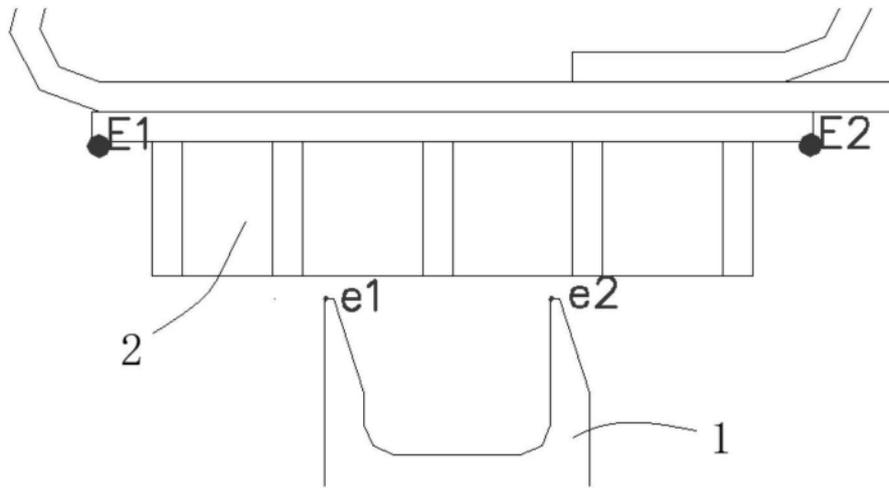


图3

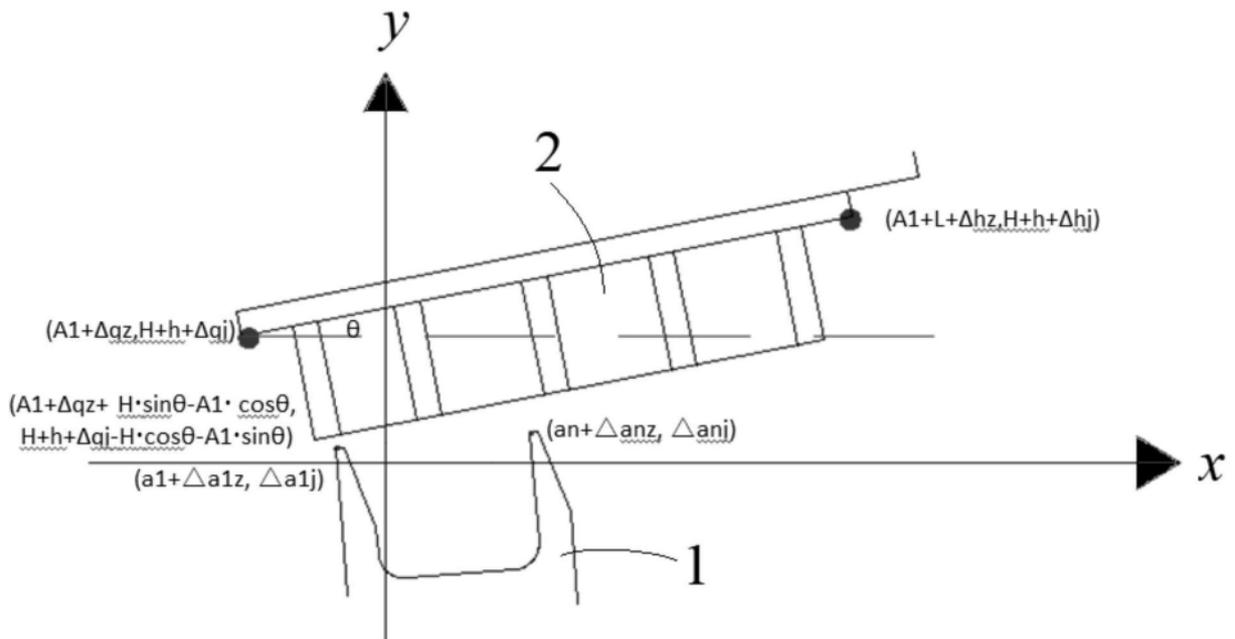


图4