

基于知识的转子系统建模与动力分析

南京航空航天大学 刘纪锋** 黄太平
沈阳航空发动机研究所 邹学岩

【摘要】提出了一种新的航空发动机转子系统模型化及分析法,将计算机辅助模型化、子结构模态综合法与复杂结构设计的专家系统技术相结合,利用知识库存储的知识,进行转子系统模型建立、模型的分析诊断和转子系统的再设计。

关键词: 转子 动力学 专家系统 失效分析 模态综合法

分类号: O 316

1 引言

随着人工智能技术的不断发展,在研究航空发动机专家系统方面,已有了一定的进展^[1,2]。到现在为止,已经发展了多种类型的诊断专家系统。但是,将人工智能技术用于航空发动机转子动力学分析中是一个比较新的课题。对于航空发动机学分析来说,不论是将一个实际的发动机转子系统进行有限模型简化,还是对其进行动力特性分析和系统再设计,都具有很高的难度和繁琐的过程,并且需要具有一定的工程实际经验和知识。本文的目的就是提出一种新的航空发动机转子系统模型化方法,将计算机辅助模型化、子结构模态综合法^[3]与复杂结构设计的专家系统技术^[4]相结合,利用知识库存储的知识,进行转子系统模型建立、模型的分析诊断和转子系统的再设计。

2 模型建立与专家系统

实际上,对于许多发动机零件,如联轴器和阻尼器,是很难建立一个与实际相吻合的模型。这就需要通过长期积累的测试经验建立一个近似模型。若以一定规则的知识表达方式,存储已有的模型化经验、模态综合知识、测试经验等,利用专家系统技术,可形成转子动力学分析的专家系统。根据航空发动机转子系统的结构特点,系统中的知识表达和推理机构如下:

由于航空发动机的简化模型和算法中,既有很多单元划分和算法选择的经验性的描述型知识,又有结构参数选取的数值型知识。因此,本系统采用的知识表达方式:产生式规则+ 框架结构。具体表达如下:

(1) 产生式规则由前提和结论构成,前提和结论由一个或多个事实构成。事实和规则模板用BNF 范式表示如下,其中< premise>、< conclusion> 是一个事实:

FACT : ::= < subject> < attribute> < value>;
RULE : ::= IF < premise> AND/OR

. . .

< premise >

THEN < conclusion >

(2) 框架结构。由于规则不易于描述结构性知识, 许多结构性知识是采用框架结构来描述的。框架是一种具有层次关系的数据结构。每一个框架都有一个框架名, 若干个槽。每个槽都有一个槽名, 槽值的意义预先约定。

根据转子动力学分析的特点, 在对已有的知识库和数据库进行推理时, 选择正向推理和宽度搜索相结合的控制策略。正向推理是由事实驱动的, 可以方便地将所知的系统初始条件和参数输入到事实库中, 将其与知识库中的规则式知识相匹配, 直到没有可匹配的知识为止。在搜索过程中, 知识库构成了一个具有初始结点、中间结点和目标结点的与或树结构。每条知识均具有一个置信度, 以作为知识比较和确定结论可靠度的依据。由此, 可形成一个为用户提供建议的、包含多种知识的动力分析专家系统。

3 知识库和数据库的组成、系统再设计与优化

知识库主要包括由产生式规则和框架结构表达式的知识, 存储在链表形式的数据结构。用 C 语言表达的规则库结构如下:

```
struct rule { struct premise * if; struct action * then; } rule;
```

利用数据库存储动力分析数据, 需要做两项工作, 即需要将动力分析中的数据进行分类, 抽象成一个概念模型, 以实体联系来表示。其次, 将实体联系模型转换为便于计算机高效率检索的数据模型。数据库是由实体、实体之间的联系和属性值组成。实体联系通常用数据模型来实现, 实体和属性则以二维表和记录的形式表示。数据项是构成数据库的最小命名的存储数据结构; 记录是数据项的集合, 用以描述实体, 它的格式为:

```
RECORD segment 1, segment 2, ..., segment n
```

关系模型是处理实体与实体之间联系的数据模型, 它所处理的基本结构是一个二维表。关系表示为: $R(D_1, D_2, \dots, D_n)$, 其中 R 表示关系名, D_i 代表二维表中第 i 个属性。

转子动力学的知识库和数据库主要是满足航空发动机转子动力分析的设计要求。如将典型发动机结构的有限元模型和计算分析结果, 存储在发动机转子部件设计的数据库中。当进行新的发动机转子动力学设计或进行系统的动力特性修改时, 能够参照知识库中的经验数据进行设计。知识库和数据库中将存储转子动力学分析的设计准则、概念、发动机型号、发动机结构参数、有限单元模型等信息。对于一个新系统的建模、诊断和再设计, 存储信息可以用作主要的参考依据和知识。

对于具有高转速范围和高精度特点的航空发动机, 结构振动问题是发动机产生故障的主要危险源和设计限制。对转子系统及部件的动力分析和设计的典型设计周期框图如下:

初始设计: 设计需求; 初始系统模型和参数选择。

再设计: 失效模式分析(诊断); 系统和部件模型化, 分析和测试; 系统优化和部件再设计; 满足设计要求。

对航空发动机转子动力学设计来说, 模型化、诊断和再设计包含许多准则, 几项主要要求如上。为完成这些任务, 部件特性、动力载荷历程、失效模式分析和部件再设计技术的启发式经验, 可以系统地按排到知识库中。它们将在建立模型、诊断和再设计的循环设计过程中, 协助设

计者使用专家系统技术求解转子动力学问题。

4 算 例

以图 1 所示的一个简单的航空发动机转子系统的设计分析为例,说明本方法。现列举了部分转子学分析的设计要求如下: (1) 发动机系统必须防止冲击载荷。指出哪些发动机部件对于冲击载荷是非常关键的,如叶片丢失产生的冲击。部件必须设计成使发动机转子系统具有最小的损坏可能性。(2) 发动机转子系统总的结构质量必须小于某一质量 P 。以求重量轻。(3) 发动机的一阶临界转速区必须避开其工作转速。(4) 发动机转子部件的振动幅值不能大于限定值。如果振动幅值过大,则确定增加阻尼器。(5) 发动机转子系统必须设计成有较长的工作寿命。转轴上作用有较大的陀螺弯曲载荷,造成轴的弯曲应力循环。因此,转轴应有一个满意的高频疲劳循环寿命。

分转子学分析的设计要求如下: (1) 发动机系统必须防止冲击载荷。指出哪些发动机部件对于冲击载荷是非常关键的,如叶片丢失产生的冲击。部件必须设计成使发动机转子系统具有最小的损坏可能性。(2) 发动机转子系统总的结构质量必须小于某一质量 P 。以求重量轻。(3) 发动机的一阶临界转速区必须避开其工作转速。(4) 发动机转子部件的振动幅值不能大于限定值。如果振动幅值过大,则确定增加阻尼器。(5) 发动机转子系统必须设计成有较长的工作寿命。转轴上作用有较大的陀螺弯曲载荷,造成轴的弯曲应力循环。因此,转轴应有一个满意的高频疲劳循环寿命。

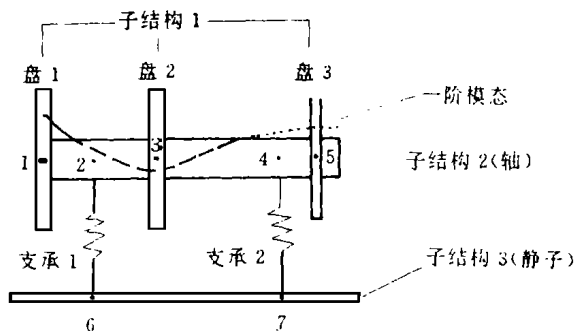


图 1 转子系统模型简图

4.1 初始系统设计

初始系统构型和参数的选择尽可能靠近设计要求,对于转子动力学设计,基于过去的经验和当前的设计要求,系统结构模型如图 1 所示。为实现诊断和再设计目的,将该系统分成多个子结构。从图 1 可看出,转子系统有 3 个子结构类型:子结构类型 1(由 3 个盘构成);子结构类型 2(转轴);子结构类型 3(静子包括所有非旋转部件)。子结构 2 和 3 通过连接单元即轴承 1、2 连接。对于每个子结构,已知其材料特性、载荷条件、边界条件和其他设计信息。将这些信息编排成一数据结构,可以存入系统的知识库和数据库。

4.2 失效分析

失效分析所关心的是,设计的转子系统会产生哪些动力学方面的失效,具体是哪一个子结构或连接单元产生失效。基于过去发生过的故障记录,设计要求和分析判断,建立可能的失效模式^[5]。典型的失效模式分为两类:全局失效和局部失效。全局失效是指整个发动机系统的动力失效,可能原因有气流激振,外物冲击,转子系统的轴向、弯曲和扭转共振,阻尼器油膜失稳等等;而局部失效强调简单结构部件或相邻部件连接处的局部缺陷,一般有蠕变屈曲、应力断裂、高频和低频疲劳断裂、部件的氧化腐蚀和磨损等等。发动机的失效分析是一项复杂的工作,专家系统提供了一种区分失效模式及其产生原因和影响的系统方法。对于发动机整个转子系统来说,转子系统共振是其主要失效模式,所以需要进行共振研究。根据有限单元法和模态综合子结构技术,建立转子系统的动力分析程序。对转子系统进行稳态和瞬态响应分析,可以得到哪一个子结构或单元可能产生失效;并计算出转子上的振动载荷,用于评估转轴的循环寿命。对图 1 的转子系统,得到其自然频率为 219.5、258.5 和 769.9 rad/s。可以看出,系统的自然频率非常低,盘 1 处的振幅最大。子结构模型计算结果表明,发动机部件需要再设计以解决这些问题。

4.3 系统再设计

对上述发动机转子系统, 如果再设计的任务是减小振动位移, 就需要做相应的设计考虑: (1) 改变轴的几何尺寸; (2) 增加一个动力吸振器; (3) 改变轴的材料等。根据失效模式分析, 可以判断哪一个部件需要再设计。系统再设计的可能部件是(1) 轴承(2) 盘 1(3) 轴。对修改后的转子系统再做动力响应分析。计算分析和启发式规则能够确定对部件的设计修改给系统动力响应带来的影响。修改设计后, 可以发现轴承刚度和盘 1 几何形状的改变, 对转子系统的临界转速没有显著影响。改变轴的几何尺寸使得系统的临界转速有较大的变化。

所建立知识库的一个典型规则是: 如果失效模式是一阶共振, 且一阶模态的最大振幅值在盘 1 处, 且刚性支承的影响很小, 且改变盘参数的影响很小, 那么系统的薄弱单元是“轴”。使用失效分析和子结构模型, 可以评价所有存储在计算机中的部件的设计修改, 避免由于设计修改而带来的新的失效。

5 讨 论

通过以上论述, 可以看到本方法有如下优点: (1) 使用了重要的诊断和设计知识, 用以确定部件特性与失效模式的关系和影响。(2) 基于知识的系统能够帮助用户检查和推导模型装配过程, 子结构模型特性存入计算机。对航空发动机转子系统的设计和修改具有相当重要的指导意义。(3) 模型、诊断和再设计的循环过程, 为用户提供了模型建立和动力分析的知识, 使用户能更好地建立系统模型, 获得较精确的动力分析结果。研究结果表明本方法是具有一定的灵活性和有效性。

参 考 文 献

- 1 Elattal H, Elsayed E, Elkhatib A. Expert System Techniques to Automated Machinery Diagnostics Using Vibration Analysis Proceeding of the 7th International Modal Analysis Conferences, 1989
- 2 Orsborn K. Using Knowledge-Based Techniques in System for Structural Design. Computers and Structures 1991, 40 (5): 203- 1211
- 3 田盛丰等编著 人工智能原理与应用 北京: 北京理工大学出版社, 1993
- 4 殷学纲, 陈淮等 结构振动分析的子结构方法 北京: 中国铁道出版社, 1993
- 5 宋兆泓主编 航空发动机典型故障分析 北京: 北京航空航天大学出版社, 1991

(责任编辑 王震华)