

温度试验可视化系统的关键技术研究

郑 澎^{1,2)} 何铁宁²⁾ 刘建波²⁾

¹⁾(北京理工大学计算机科学与工程系, 北京 100081) ²⁾(中国工程物理研究院计算机应用研究所, 绵阳 621900)

摘 要 随着数值模拟精度的不断提高以及温度试验测量手段的不断丰富,传统的以一组2维曲线显示多通道采集数据的试验可视化方式无法满足需求,为此提出了一种新的温度试验可视化系统,该系统采用数值模拟技术和试验相结合的方法来进行温度试验的分析和评估,这就为提高试验数据的显示度开辟了新途径。该系统将随时间变化的试验数据,以彩色云图方式动态地显示在有限元模型上,并通过数值模拟结果和试验数据的映射来获得无法布置测点的位置的温度分布情况;同时针对试验测量数据3维可视化的特点,设计了系统的可视化数据结构,并实现了剖切探测、模型比对和云图绘制。该系统的构造方法还可以推广应用到静力、离心等其他环境试验数据3维可视化中。

关键词 温度试验 数值模拟 可视化 彩色云图

中图分类号: TP391.72 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2007)01-0148-05

Key Technology Research of Temperature Test Visualization System

ZHENG Peng^{1,2)}, HE Tie-ning²⁾, LIU Jian-bo²⁾

¹⁾(Department of Computer Science and Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

²⁾(Computer Application of China Academy Engineering Physics, Mianyang 621900)

Abstract With the improvement of numerical simulation's precision and temperature test's measure methods, better test visualization technique is required. This system integrates numerical simulation and test together, to for visualiz test data, which is a new way for improving test analysis and evaluation. Test data is typically collected in a waveform data type while simulation typically presents results in 3D geometry. In addition, test data locations are sparse compared to relatively dense FEA mesh results. This system uses position matching and mapping method to generate node data on basis of test data and FEA results, and plots generated data on FEA model in color cloud picture mode, thus makes it possible for visualizing all remaining nodes which can't be collected by test. In the system, specific data structure and interactive method such as cutting, probing and comparison are designed. The construction method of this visualization system can also be applied in statics test and acentric test.

Keywords temperature test, numerical simulation, visualization, color cloud picture

1 引言

温度试验为武器的库存、设计提供了重要依据,而对试验采集的数据进行有效的收集和管理,进而通过可视化手段进行分析,则是温度试验分析的一个重要手段。众所周知,每次试验将产生大量的测试数据,且这些数据一般与试验对象的结构有关,在

大多数情况下,试验中的测点约为数十个,其对应着数十个采集通道,一般是通过绘制各通道采集数据的2维曲线图来观察试验结果,并和试验前的温度预估计算结果进行分析对比,这种2维的可视化方式显然不够形象直观;另一方面,对那些无法布置测点而又需要关心的位置,其温度分布情况无法得到。

鉴于此,本系统是将温度试验测量数据与其对应的温度场数值的模拟计算结果进行对比与分析,

收稿日期:2005-09-08;改回日期:2005-12-01

第一作者简介:郑澎(1972~),女,高级工程师。1994年获四川大学学士学位,现为北京理工大学博士研究生。主要从事计算机仿真、虚拟现实、可视化等研究,曾获得军队科技进步二、三等奖四项。E-mail:eliza_zheng@sohu.com

以有限的测点数据为标准,将其他位置的温度映射到有限元模型上,并进行3维可视化显示,这样不但能更加形象显示试验结果,而且增加了显示的整体性和相关性,同时通过各种可视化交互方法,还可以提高数据分析的效率。

2 系统概况

本系统借鉴 PDM (product data management) 系统的构造思想,以试验项目管理为主控,以数据管理为核心,将数值模拟计算、原来的数据采集系统、可视化和报告生成等功能集成起来。这样做的优点在于:①试验项目管理可以把试验中分散的数据处理、可视化和分析等工作流程化,使数值模拟和试验紧密结合;②以数据库作为模块间数据和文件的传递、交换中心,能够减少模块间的耦合性;③能方便地将现有的试验采集系统集成进来。本系统功能结构如图1所示。

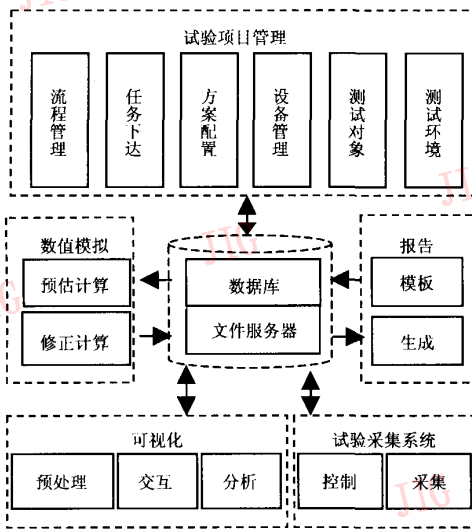


图1 系统功能结构图

Fig. 1 System function structure

该系统中的数据管理主要是通过元数据技术实现。系统中流动着各种结构和非结构化数据,其中包括试验方案、报告、任务书、试验数据、有限元模型等,而传统关系数据库只能管理结构化数据。元数据^[1,2]是关于数据的数据,它包含数据、操纵数据的进程和应用程序结构和意义的描述信息,其主要目标是提供工程数据资源的全面指南,而且通过元数

据还能够在复杂数据、数据流程间建立有机的联系。本系统先将非结构化数据用元数据表示,然后由数据库存储管理这些元数据,并用文件服务器存储图文档等。文件服务器和数据库可以分别位于不同的机器,且文件服务器可以有多个。

3 可视化关键技术

3.1 数据结构设计

可视化数据包含有随时间变化的试验数据,映射数据和有限元结果文件,其中,有限元结果文件数据量最大,为提高可视化算法的效率,需对其进行预处理。预处理方法是只保留可视化所必需的节点、单元、材料和各时间步的节点的场值信息,其他信息一概去掉,这样可使数据量减少40%。可视化的数据结构包括以下内容:头域(包含节点数,模型体单元数)、节点域(包含节点编号、节点空间坐标)、材料域(包含模型中各种材料的比热、传导系数等)、单元域、对照表域(包含试验测点与有限元节点的位置对照关系)、数值模拟场值域(包含各时间步的节点场值)、采集值域(包含按时间间隔采集的试验值)、映射值域(包含试验数据与数值模拟数据的映射值)。其中单元域中的体单元包含单元编号、单元材料编号、单元类型和节点等数据,而剖切探测操作则主要基于体单元进行。

“域”的描述信息、操作“域”的数据抽取程序、映射程序等应用程序的描述信息都包含在元数据中。其中,“域”的存储对象描述了它所对应的数据块的存储位置,这些数据块存放在不同的文件服务器上。由于数据抽取程序在处理数据块时,采用了内存映射方法,这使得所进行的读写操作都在内存中进行并以标准的内存地址形式来访问,从而提高了数据块的处理速度;当数据块大于2GB时,则采用分块内存映射方法处理。

3.2 试验数据与数值模拟数据的映射

在温度试验前,先进行预估计算,然后将试验结果与预估计算结果进行比较,再根据经验,修改计算模型中的一些参数,以便修正计算模型,经过多次计算后,就使数值计算结果与试验结果在有限的测量点上达到吻合,而且只要误差在10%以内,就能够满足工程设计要求了;另外,采用有限元分析在结构上生成了相对数量较多的网格点,其不仅能基本与真实物理结构的拓扑形状一致,而且能够获得整个

结构上的温度场分布。因此,对无法布置测点以及无测点的位置,可以采用测点位置的试验数据作为标准,依据有限元分析结果中各个节点之间的相互关系来映射出未知测量点的测量数据,其趋势基本能够反应真实的试验状况,这是本系统的一大特色。映射方法主要有反求法和多点平均修正方法。

反求法是用测得的温度值作为已知边界条件,并利用数值计算模型来反求出其余未知点的值,数值计算采用的热传导方程如下:

$$\rho c \left[\frac{\partial T}{\partial t} + u_x \frac{\partial T}{\partial x} + u_y \frac{\partial T}{\partial y} + u_z \frac{\partial T}{\partial z} \right] = \ddot{q} + \frac{\partial}{\partial x} \left[k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right] \quad (1)$$

其中, ρ 代表材料密度, c 代表比热, u_x 、 u_y 、 u_z 分别代表3个方向的热传导速度, \ddot{q} 表示热生成率, T 代表温度, k_x 、 k_y 、 k_z 分别代表3个方向的热传导率。

多点平均修正方法是采用若干个所在位置材料相同,且位置相近的测点的平均值去修正邻近区域的数值模拟数据,其中,反求法适合采集时间间隔较长的情况,而多点平均修正法则实时性较好。

无法布置测点位置的温度求解方法是:与该位置空间相邻的所有单元节点的修正后的值,可按照其距离该点位置的远近进行综合加权平均后得到。

映射的另一个问题是进行试验模型和有限元模型的匹配。如图2所示,在系统的方案配置模块中,可使用模型匹配功能将测点位置和有限元模型关联起来。匹配时,使用者在3维显示界面中,先将各个试验测点通道的标记用可视的方式“拖放”到有限元模型的相应位置上,然后,系统根据材料匹配和距离最小的原则选择最接近的有限元节点和测点进行匹配。

3.3 可视化交互

针对实际需要,本文设计了剖切探测,将试验可视化和数值模拟可视化进行对比显示,根据材料范围进行有选择的可视化以及组合查询可视化结果等交互功能。多窗口对比显示主要通过创建基于OpenGL的不同显示线程来实现,而线程间则通过临界区进行通讯。

剖切探测的基本过程是用任意切面来剖切可视化模型和从切面上探测任意节点位置随时间变化的数据,其实现步骤如下:

(1) 求模型与切平面的交点

设切面法向量为 n ,体单元的节点坐标为矢量

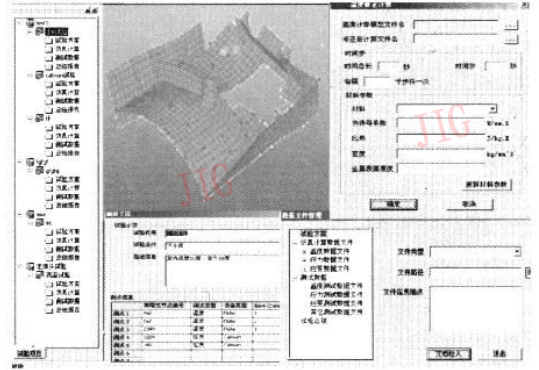


图2 模型匹配界面

Fig. 2 Model matching interface

p , 则求交测试公式为

$$(p - n) \cdot n = \begin{cases} = 0 & (\text{节点位于切平面上}) \\ < 0 & (\text{节点位于切平面下部}) \\ > 0 & (\text{节点位于切平面上部}) \end{cases} \quad (2)$$

求交点过程是先依次求出体单元的所有节点的求交测试结果;然后根据结果判定体单元与切平面的位置关系,对于与切平面不相交的体单元,可以不予考虑;最后,计算相交单元与切平面的交点坐标,并用线性插值法求出交点的数据值。

(2) 生成剖面多边形

将相交单元的所有交点连接用来生成剖面多边形的方法很多,在文献[3,4]中,均提出借助含有边表的单元信息描述表的实现方法。本文设计的可视化数据结构,不仅简化了体单元的内容,且没有边表描述,其具体实现方法是:先在相交单元的每个相交面和切平面的交点中,任意提取一对交点作为剖面多边形的顶点;同时在剩余的相交面的交点对中,寻找和顶点重合的点,并把另外一个交点作为第3个顶点,以此类推,直至搜寻回到第1个顶点,即得到剖面多边形的顶点序列;然后根据切面的法向量方向来调整顶点序列的排列顺序,由于这种方法的好处是不需要知道模型单元中的边信息,因此减少了对内存的需求,其缺点是增加了寻找下一个顶点的时间;最后,由于三角形单元内可直接采用双线性插值的方法生成直线段来逼近等值线,所以还需将剖面多边形三角化。

(3) 探测

用鼠标任意选择剖面上的一个位置,系统即可找到最接近该位置的节点,并显示节点上随时间变

化的映射值。在实现时,由于用鼠标选择得到的位置是屏幕 2 维坐标,因此需要通过反向映射才能得到物体坐标,而且将 3 维物体绘制在 2 维屏幕上,还需要经过多级矩阵变换,其标准过程如图 3 所示。

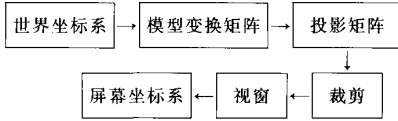


图 3 变换过程

Fig. 3 Matrix conversion

由于求解该过程的各种逆变换计算复杂,而如果采用 OpenGL 提供的功能,则能够快速方便地实现。采用 OpenGL 时,首先,必须启动 OpenGL 的深度测试功能,并将深度比较值设为“小于等于”*glDepthFunc(GL_LEQUAL)*,才能使得当前深度缓存器中各位置保存的是离观察视点最近的点的深度值;然后,通过给 *glGetDoublev* 函数分别指定参数 *GL_MODELVIEW_MATRIX*、*GL_PROJECTION_MATRIX* 和 *GL_VIEWPORT* 来得到当前各变换矩阵;接着,采用 *glReadPixels* 从深度缓存中得到与当前屏幕坐标位置对应的深度值;最后,使用 *glUnProject* 函数直接将屏幕 2 维坐标通过反向映射来得到物体坐标。但需要注意的是,在系统的窗口坐标系中,原点在左上角;而在 OpenGL 的窗口坐标系中,原点则在左下角。具体实现的代码片断如下:

```

glGetDoublev( GL_MODELVIEW_MATRIX, modelmatrix )
glGetDoublev( GL_PROJECTION_MATRIX, projmatrix );
glGetIntegerv( GL_VIEWPORT, t );
glReadPixels( ( GLint ) pt. x,
              ( GLint ) ( * ( t + 3 ) - pt. y ), 1, 1,
              GL_DEPTH_COMPONENT,
              GL_FLOAT, &depth );
gluUnProject( pt. x, * ( t + 3 ) - pt. y,
              depth, modelmatrix,
              projmatrix, t, &x, &y, &z );
  
```

按照距离最短法则,即可从模型的节点中找到与求得的物体坐标最接近的节点,并可计算和显示它随时间变化的修正值。可视化交互界面如图 4 所示。

3.4 绘制技术

由于可视化绘制需要建立颜色与场值映射关系,因此一般的映射过程主要包括颜色绘制和查表变换,而选择好的映射方法则不仅能够高效地表达

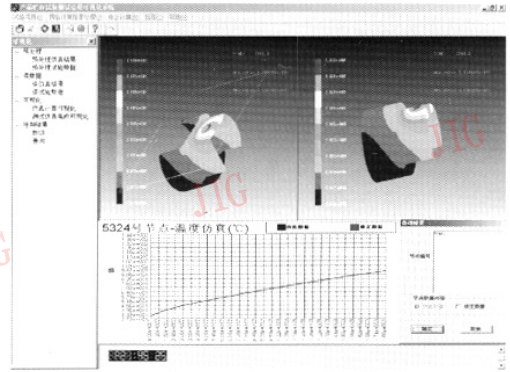


图 4 可视化交互界面

Fig. 4 Visualization interactive interface

可见的和不可见的数数据场,而且有利于人的视觉系统的分辨和识别。

云图是科学计算可视化中常用绘制方法,它可根据单元、节点的场量值用各种颜色来填充分布区域,其主要包括条形云图和平滑云图两种绘制方式^[5],本系统基于 OpenGL 实现了颜色绘制,并在传统查表变换的基础上,增加了一种基于兴趣因子的查表变换。

基于 OpenGL 实现的颜色绘制,比采用传统的扫描绘制速度快很多,这是因为 OpenGL 采用了硬件加速的光栅化技术,其填充效果能达到像素级渐变^[6]。用 OpenGL 实现线性渐变的平滑云图,只要给出单元各控制顶点的颜色值,则单元内像素点的颜色值就能根据顶点的值自动线性插值得到,从而达到快速填充绘制的目的;当实现条形云图时,需首先将单元三角化,以求出三角形单元中的等值区域;然后将同一等值区域的控制顶点赋给同样的颜色值,其结果是颜色将整块填充等值区域。

查找表是指一个容纳一组颜色的颜色表,其中最小、最大索引所代表的颜色对应着最小、最大场值,绘制时,一般采用线性变换或者对数变换将位于最小值、最大值之间的场值映射到颜色表。设颜色表有 *L* 个颜色索引,若以线性变换为例,则其变换关系为

$$f(V_i) = \left[\frac{(V_i - V_{min})}{(V_{max} - V_{min})} L \right] \quad (3)$$

f(V_i) 代表与场值 *V_i* 对应的颜色索引, *V_{max}* 和 *V_{min}* 代表场值的最大、最小值。从聚类空间的角度分析,上述变换可使那些接近的场值映射到颜色表中同一颜色索引上,且这些映射到颜色表中同一颜

索引的场值为一个聚类。设对应某个颜色表具有 L 个颜色索引,某模型共有 K 个聚类域,且每个聚类域对应颜色索引数为 1,则基于兴趣因子的查表变换就是首先用传统变换方法计算出 K 个聚类域,以及与域空间对应的最大、最小值;然后,用户给每个聚类域提出兴趣因子 θ_i ;最后,系统根据兴趣因子即可重新计算每个聚类域可对应的颜色:

$$J_i = \left[\frac{\theta_i}{\sum_{i=1}^K \theta_i} L \right], (K \leq L \text{ 且 } \sum_{i=1}^K J_i = L) \quad (4)$$

最后,重新用式(4)计算,其中 V_{\max} 和 V_{\min} 用聚类域中最大、最小值代替, L 用 J_i 代替, θ_i 为第 i 个

聚类域兴趣因子。本变换方法的优点在于,如果出现人们关心的区域温度梯度较小,且整个区域温度梯度又较大的情况,则可以用较多的颜色更加直观地显示所关心区域温度变化,此方法在其他物理量(如应力、应变等)的显示中同样适用。如图 5 所示,图 5(a)是某片状模型的材料组成示意图,区域 A 和区域 C 是导热材料,区域 B 为隔热材料;图 5(b)是用线性查表法绘制的条形云图,大部分颜色带集中在人们并不关心的区域 B 上,而对关注的区域 A 和区域 C 却各自只有一种颜色带表示,看不出温度的变化情况;图 5(c)是用基于兴趣因子查表法绘制的条形云图,关注的区域拥有更多的颜色带。

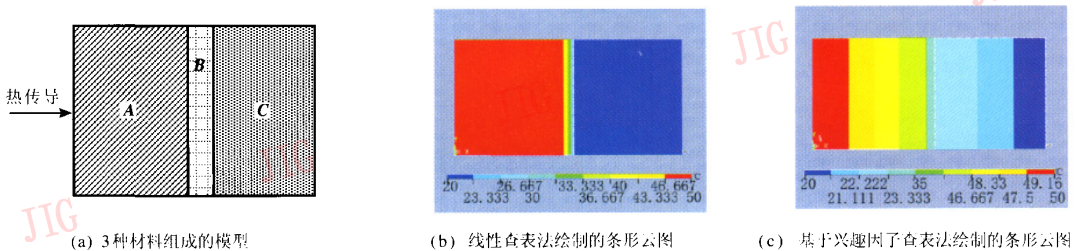


图 5 基于兴趣因子的查表绘制

Fig. 5 Table index drawing based on interest factor

4 结 论

本系统首先将与空间位置和时间相关的测试数据在有限元模型上显示出来;同时,可以将试验数据与数值计算结果相结合,并把映射后的数据可视化,以达到试验数据 3 维可视化的目的;试验人员通过实时采集、实时分析、比较试验和数值计算数据,可洞悉到更多规律。下一步系统将在映射算法的求解效率上进一步改进提高。

参考文献 (References)

- Clatchey R Mc. The role of meta-objects and self description an engineering data warehouse [A]. In: International Database Engineering & Applications Symposium [C], Montreal, Canada 1999.
- Gu Ling, Lin Zong-kai, Guo Yu-chai. The key problems of engineering data management system's design and realization[J]. Journal of Software, 1997, 8(3):83~88. [顾宁,林宗楷,郭玉钗. 工程数据库管理系统设计、实现的几个关键问题[J]. 软件学报, 1997, 8(3):83~88.]
- Yang Xiao-song, Gu Yuan-xian, Li Yun-peng, et al. Arbitrary cutting FEM, isoline generating and color cloud picture[J]. Journal of Image and Graphics, 1999, 4(7):574~578. [杨晓松,顾元宪,李云鹏等. 三维有限元模型的任意剖切及其等值线与彩色云图生成的方法[J]. 中国图象图形学报, 1999, 4(7):574~578.]
- Liang Zheng-guang, Tang Ren-yuan. Cutting visualization of electromagnetic FEM [J]. Electric Machines and Control, 2004, 8(3):242~246. [梁振光,唐任远. 电磁场有限元结果的剖切显示[J]. 电机与控制学报, 2004, 8(3):242~246.]
- Wang Zhang-qi, An Li-qiang, Wang Meng. Visualization method for FEM analysis data [J]. Journal of Engineering Graphics, 2002, 23(1):72~76. [王璋奇,安利强,王孟. 有限元分析结果的可视化处理方法[J]. 工程图学学报, 2002, 23(1):72~76.]
- Sun Xiao-yan, Wu Zeng-gui. Fast isoline filling based on MFC and OpenGL[J]. Computer Application Research, 2005, 22(3):169~172. [孙晓燕,伍增贵. 基于 MFC 和 OpenGL 的快速填充等值线实现[J]. 计算机应用研究, 2005, 22(3):169~172.]