

## SPAR 平台立管相互碰撞的有限元分析

陈云水, 王德禹

(上海交通大学海洋工程国家重点实验室, 上海 200030)

**摘要:**以 SPAR 平台中立管与立管碰撞为研究对象, 采用三维有限元模拟碰撞过程, 并采用显示动力求解结构的最大碰撞力及最大碰撞应力, 计算且讨论了内压、碰撞时立管之间的夹角、碰撞时立管速度之间的夹角及摩擦对立管碰撞的影响。结果表明一定的内压值可以使立管在径向更不容易破坏, 对于带有保护层的立管, 不同角度碰撞对立管碰撞的影响相对较少, 当碰撞角度为 45 度, 最大碰撞应力比较小, 摩擦对立管碰撞影响不是很大。

**关键词:** SPAR 平台; 立管碰撞; 有限元; 碰撞力及应力

**中图分类号:** P752

**文献标识码:** A

SPAR 平台由于其圆柱形浮力体在水面以下相当深度处, 水面波浪对其作用的影响小, 因而运动性能、稳性及受力情况较好, 因此 SPAR 平台广泛应用于深海石油的开采<sup>[1]</sup>。常见的 SPAR 平台主要由四个系统组成<sup>[2]</sup>: 上部模块、壳体、系泊系统和立管(生产、钻探、输油等)。各种立管就构成了一系列的垂直或者接近垂直的立管群, 一个立管群可能有 20 甚至更多的单个立管。在 SPAR 平台中最常用是钢悬链弦立管(SCR)和顶端张紧的立管(TTR)两种。

SPAR 平台上的立管群, 由于干舷的位移、波浪的作用和涡激振动, 立管之间会发生很多碰撞, 如同同心立管系统中连接处的碰撞; 立管与喇叭型弯曲定位器(trumpet bending restrainers)的碰撞。Li Yousun<sup>[3]</sup>等人提出了一种算法, 这种算法建立在时间域上解决立管多处碰撞问题, 在算法中, 强调接触约束, 并把每对接触力都加到整体控制方程上, 这些接触力要么足够大以穿透管壁, 要么随着接触的分开而消失, 这种算法称之为“拟穿透”(virtual penetration), 基于这种思想可以通过迭代算出接触力; Euclides Trovato Neto<sup>[4]</sup>等人探讨了在立管碰撞时计算立管参与质量(collision participating masses)的方法, 提出一种数值方法来计算相邻两根立管碰撞的作用质量(interaction masses), 不过这种方法是建立在两个力学系统之间的循环作用能够用特征质量(representative masses)来描述, 而这种特征质量与碰撞过程中消耗的能量息息相关。目前 Huse<sup>[5]</sup>采用不同的立管模型做了大量的测试, 那些大尺寸的测试已经提供大量的试验数据发展半经验公式来预测立管碰撞, 并且用数值的方法计算出不同工况下立管碰撞的参与质量, 并与由群变换理论推导出来的公式进行对

比, 得出碰撞参与质量占总质量的 8.5% ~ 9.5%; 邵炎林<sup>[6]</sup>等人研究了海洋结构中典型圆管构件的碰撞损伤, 以立管-立管模式为对象, 采用准静力的方法, 分析了海洋石油开采设施中的典型圆管构件在侧向碰撞挤压作用下的结构行为。研究了在不同边界条件和初始轴向压力水平下, 圆管构件的凹坑损伤形成过程和侧向承载力。结果表明边界条件和初始轴向压力对损伤形成以及侧向承载力的影响显著, 初始轴向拉力的影响则较小。S. R. Wilmschurst<sup>[7]</sup>等人利用有限元软件 ABAQUS 建立立管局部碰撞的有限元模型, 得出局部碰撞区域的接触力、应力和应变等一些结构响应。并通过试验验证了这个三维的有限元模型计算出来的结果能够与试验结果相吻合。而在试验和有限元模型中, 他们不仅考虑了不同的立管碰撞的相对速度, 还考虑了立管碰撞时的不同角度。

目前, 大多数的研究在求解 SPAR 平台立管之间碰撞的结构响应时, 都是假设另外一个构件为刚性体, 这实际上就是在研究立管与刚性构件碰撞的结构响应问题, 而实际情况并不是这样, 在立管碰撞的瞬间, 两立管均有不同程度的变形, 因此都视为变形体处理比较合理; 再者, 绝大多数的研究都是考虑立管的正碰撞情况, 对立管斜碰撞研究甚少。在本文中, 斜碰撞包括立管几何意义上的斜碰撞和速度意义上的斜碰撞, 前者表示立管碰撞时速度在同一个方向的情况下, 立管自身之间成一定的夹角, 如图 1 所示; 后者表示碰撞时立管几何之间的夹角是不变的(互相垂直), 速度不在同一个方向上, 成一定的夹角, 如图 2 所示。本文主要研究 SPAR 平台上的立管, 用三维有限元单元模拟碰撞的立管, 应用有限元软件 ABAQUS 中的显式动力求解器分析不同条件下立管间碰撞过程中的结构响应, 并对计算结果进行讨论分析。

基金项目: 上海市科委重大基础研究课题(编号: 05DJ14001)

收稿日期: 2006-12-27 修改稿收到日期: 2007-01-15

第一作者 陈云水 男, 硕士, 1981 年 11 月生

通讯作者 王德禹 男, 教授, 博导, 1963 年 12 月生

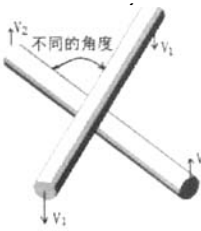


图1 立管几何意义上的斜碰撞



图2 立管速度意义上的斜碰撞

## 1 有限元模型建立

### 1.1 模型物理参数及材料属性

在海洋工程结构中使用的圆管构件的  $D/t$  ( $D$  为圆管直径,  $t$  为壁厚) 值约在 30 ~ 60 之间。本文所研究的碰撞模式中, 所研究的圆管构件均采用了  $D/t$  值为 35 的钢质圆管, 采用的材料均为理想弹塑性材料模型, 其几何物理参数见表 1。本文主要研究的是深水 SPAR 平台立管的碰撞, 在立管的外表面有保护层, 保护层材料一般都是使用氯丁二烯橡胶, 其材料属性见表 2。

氯丁二烯橡胶是一种超弹性的材料, 对于高应变, 它能提供瞬时的弹性响应。超弹性材料一般描述为“应变能电位”, 即把材料单位体积上所储存的应变能定义为材料中某点处的应力作用。由于立管之间的碰撞产生的是高应变, 一般认为氯丁二烯橡胶服从 Mooney-Rivlin 材料模式, 这个材料模式被定义成第一和第二偏应变、弹性体积变化率及三个材料参数。其中两个  $C_{10}$  和  $C_{01}$  直接与原始的材料剪切模量  $\mu_0$  相关, 另外一个  $D_1$  是弹性体积模量  $K_0$  一半的倒数。而在 ABAQUS 中,  $C_{10}$  和  $C_{01}$  大小是由单轴试验数据决定的。当没有容积试验数据可以利用时, 假设材料相对压缩率  $K_0/\mu_0 = 20$  从而估算出  $D_1$  的值。

表1 立管模型物理参数

立管构件 总长度 $L/m$	直径 $D/m$	壁厚 $t/m$	弹性模 量 $E/Pa$	泊松比 $\lambda$	屈服强度 $\sigma_y/MPa$
3	0.273	0.02	$2.05e11$	0.3	$2.8e8$

表2 氯丁二烯橡胶的材料属性

剪切模量 $MPa$	体积弹性模 量 $MPa$	$C_{10}$	$C_{01}$	$D_1$
3.103	310.3	$1.1e6$	$4.511e5$	$3.22352e-8$

### 1.2 初始速度的选取

在稳定流场中, 波浪引起的振荡 (WIO) 要比涡激振动 (VIV) 大得多, 这也表明对于裸露立管的运动位移主要是由波激振荡决定的, 可以说波激振荡将决定立管之间是否发生碰撞。然而涡激振动却决定了立管碰

撞瞬间的速度, 因此, 在预测立管碰撞的相对速度时, 涡激振动和波激振荡必须都得考虑。

关于碰撞速度的计算, J. Kim<sup>[8]</sup> 等人提出, 先对立管碰撞过程建立整体分析模型, 包括水动力作用模型和模拟碰撞整体回跳效应的整体碰撞模型, 并通过对整体分析模型长期的描述得出在时间和空间上的碰撞相对速度。Mott MacDonald<sup>[11]</sup> 等人的研究中所选取碰撞速度从 0 m/s 到 3.062 8 m/s, 本文取其中的三个: 0.806 m/s、1.5 m/s、3.062 8 m/s 进行计算讨论。

在立管的碰撞区域内, 相对速度可以定为:

$$U_{rel} = V_2 - V_1$$

$$\text{碰撞角度: } \theta = \arctan \frac{U_t}{U_n}$$

式中:  $V_1$  是立管 1 碰撞时的速度;  $V_2$  是立管 2 碰撞时的速度;

$U_n$  是相对速度的轴向分量;  $U_t$  是相对速度的切线分量。

### 1.3 载荷的简化

立管在工作中所受到载荷一般有: 管内流体产生的内压力, 管外流体产生的外压力。在本文中, 用管内均压力模拟管内流体产生的内压力, 而没有考虑管外流固耦合作用。

### 1.4 有限元模型

对于裸露立管的碰撞, 在有限元模型中, 用壳单元模拟立管, 有限元模型如图 3, 用壳单元可模拟的是具有某一方向尺度 (厚度方向) 远小于其它方向的尺度, 且沿厚度方向的应力可忽略的特征的结构。海洋平台立管的长度方向一般都远大于厚度方向。壳单元库中很多种壳单元, 这里选择线性、有限薄膜应变、减缩积分、四边形壳单元 (S4R), 这种单元适用于各种壳, 在用动力求解器求解动力问题时, 一般较其他壳单元要来得准确。对于带有保护层立管的碰撞, 在有限元模型中, 用体单元模拟立管, 用壳单元模拟立管外表面的保护层。对于接触问题, 涉及到有非常大的网格扭曲问题 (大应变分析), 采用的是细网格剖分的线性减缩积分单元 C3D8R<sup>[9]</sup>, 有限元模型如图 4。网格的划分以中间密、两端疏的方式划分, 以保证在接触区域的网格足够密。为保证有限元分析结果的精度, 总时间步长设为 1s, 最小时间增量步设为  $1e-6$ , 最大时间增量步设为  $1e-3$ 。

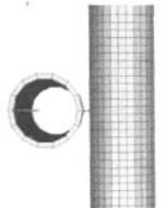
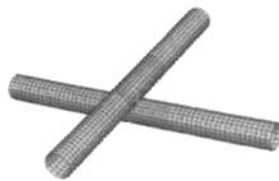


图3 裸露立管的有限元模型 图4 带有保护层的有限元模型

## 2 计算结果的讨论

### 2.1 内压对立管碰撞的影响

在立管系统中,一般的立管都要输送石油或者天然气,因此立管的内部存在内压,就会对立管的碰撞产生影响。本文模拟了碰撞时立管相互垂直且速度在同一方向上的三个不同的内压值,得到的结果如图 5 所示,随着内压的增大,立管的最大碰撞力及应力逐渐减小。Chen K<sup>[10]</sup>的研究则认为内压力的存在使管壁产生的环向应力使管更容易破坏,另一方面,管一旦被充压后,压力的变化对于临界冲击能量的影响很小,尤其对于大管径的情况,给出了临界破坏能量随内充压力的变化趋势,当环向应力达到一定程度时,再增加内压力几乎不影响临界破坏能量。此外,内压力的存在还减小了冲击在管壁上产生的凹陷变形,这使得冲击能量更多被用来产生整体变形,从而使管更容易产生总体破坏。

可以看出,尽管内压力的存在使沿立管管壁产生环向应力,但是,从立管碰撞之后所得到的径向的最大碰撞应力和最大碰撞力来看,内压的存在使立管径向的作用力变小,从某种程度来说,一定的内压值可以使立管在径向更不容易破坏。

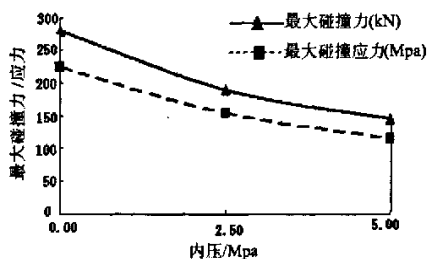


图5 内压对立管碰撞的影响

### 2.2 碰撞时立管之间的夹角对立管碰撞的影响

碰撞时立管并不都是相互垂直的,常见的是立管几何之间成一定的夹角,发生斜碰撞,即如图 1 所示的情形。图 6 和 7 分别表示了裸露立管和带有保护层立管斜碰撞时最大碰撞力及应力的变化情况。从整体的趋势来看,不管是裸露立管还是带有保护层的立管,随着角度的增大,最大碰撞力和最大碰撞应力都出现先增大,到一定的角度又逐渐减小的趋势。还可以看出,相对裸露的立管,带有保护层的立管这种变化较小。人们总是会认为在碰撞速度相同的情况下,立管接触部分越小,两者的碰撞力及应力越大,但是结果表明,立管在碰撞过程中,最大碰撞力和最大碰撞应力并不出现在人们所认为的 90° 的情况下。由于保护层的存在,最大碰撞力及应力变化较小,起到减小由于碰撞或者撞击引起的局部损伤和疲劳破坏的保护作用。

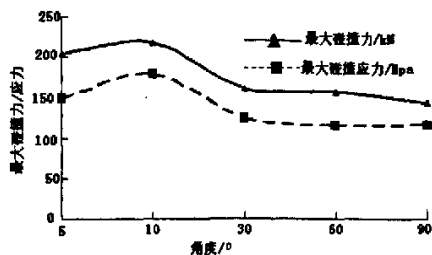


图6 裸露立管不同角度碰撞的最大碰撞力及应力

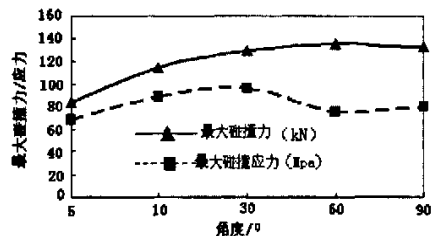


图7 带有保护层立管不同角度碰撞的最大碰撞力及应力

S. R. Wilmschurst<sup>[7]</sup>等人虽然在试验和模型中考虑了立管碰撞时的不同角度,但是只是作为一种模型计算与试验结果进行对比的一种参数,没有深入具体讨论不同角度碰撞给结构带来的影响。

### 2.3 碰撞时立管速度之间的夹角对立管碰撞的影响

由于涡激振荡或涡激振动的作用,使得每个立管运动速度的大小和方向不尽相同,因此在碰撞的瞬间,两根立管的碰撞速度往往不在同一个方向,发生斜碰撞,也即图 2 所示的情形。如图 8、9 和 10 分别表示了立管相对碰撞速度为 0.806 m/s、1.5 m/s、3.062 8 m/s 斜碰撞时立管的最大碰撞力及应力的变化情况,可以看出,不管碰撞速度多大,立管最大的碰撞应力都随着碰撞角度的增大,出现先减小后增大的趋势,当碰撞角度约为 45° 时,最大接触应力相对较小,说明在其他条件一定的情况下,碰撞角度约为 45° 时结构是比较安全的;而最大碰撞力也基本满足这种变化趋势,但是相对较小的最大碰撞力出现在不同的角度。

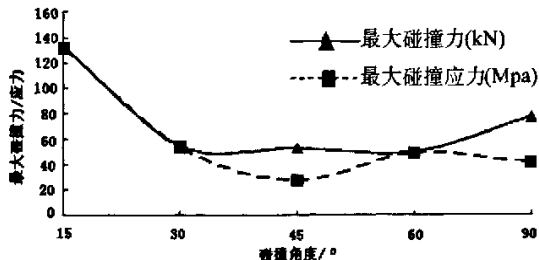


图8  $U_{rel} = 0.806$  时带有保护层立管不同碰撞角度的最大碰撞力及应力

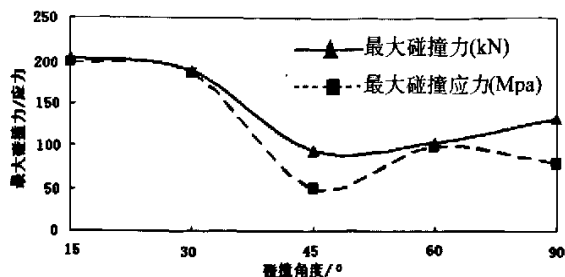


图9  $U_{rel} = 1.50$  时带有保护层立管  
不同碰撞角度的最大碰撞力及应力

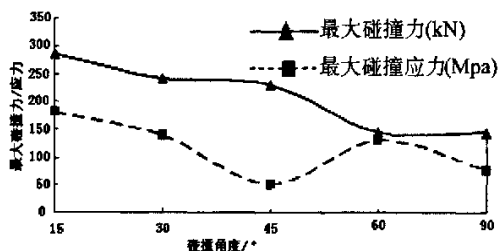


图10  $U_{rel} = 3.0628$  时带有保护层立管  
不同碰撞角度的最大碰撞力及应力

图11表示的是当  $U_{rel} = 1.50$  m/s 时在不同碰撞角度下立管碰撞接触时间。结果表明,当碰撞角度约为  $45^\circ$  时,立管碰撞接触时间最长,我们也可以从动量的角度来考虑,当立管碰撞时动量不变,作用时间越长,之间的作用力越小,这与前面得到的在  $45^\circ$  左右时立管碰撞最安全的结论相吻合。

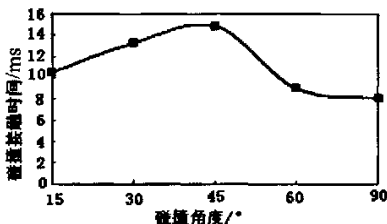


图11  $U_{rel} = 1.50$  时不同碰撞角度的立管碰撞接触时间

#### 2.4 摩擦对立管碰撞的影响

立管之间的碰撞往往都是斜碰撞,保护层表面比较粗糙,碰撞时就会产生摩擦力,就不得不考虑摩擦力对立管碰撞的影响。本文考虑的是立管发生速度意义上的斜碰撞的情况下摩擦对立管最大碰撞力及应力的影响,并且摩擦系数取  $0.5^{[11]}$ 。图12和图13分别表示了有无摩擦下立管最大碰撞力和最大碰撞应力的比较。从图上可以看出,立管在以不同的碰撞角度碰撞时,摩擦使立管的最大碰撞力及应力稍微有所增加,因此可以说,摩擦对立管的最大碰撞力及应力影响并不是很大。

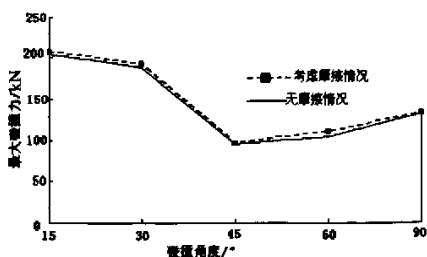


图12 考虑摩擦立管碰撞的最大碰撞力比较

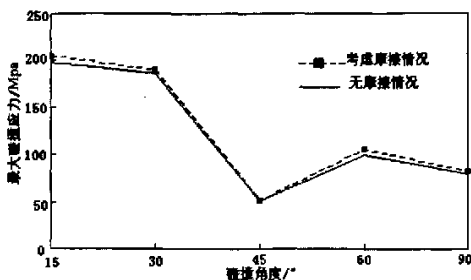


图13 考虑摩擦立管碰撞的最大碰撞应力比较

### 3 结论

1) 内压的存在使立管径向的作用力变小,从某种程度来说,一定的内压值可以使立管在径向更不容易破坏;

2) 对于几何意义上的斜碰撞来说,随着角度的增大,最大碰撞力和最大碰撞应力都出现先增大后逐渐减小的趋势,因此最大碰撞力和最大碰撞应力并不出现在人们所认为的  $90^\circ$  的情况下,而是在小于  $90^\circ$  的情况,此外,相对裸露的立管,带有保护层的立管这种变化较小;

3) 对于速度意义上的斜碰撞来说,不管碰撞速度多大,立管最大的碰撞应力都随着碰撞角度的增大,出现先减小后增大的趋势,当碰撞角度约为  $45^\circ$  时,最大接触应力相对较小,说明在其他条件一定的情况下,碰撞角度约为  $45^\circ$  时结构是比较安全的;而最大碰撞力也基本满足这种变化趋势,但是相对较小的最大碰撞力出现在不同的角度;

4) 考虑立管在速度意义上的斜碰撞时,摩擦使立管的最大碰撞力及应力稍微有所增加,因此摩擦对立管的最大碰撞力及应力影响并不是很大。

#### 参考文献

- [1] 张帆,杨建民,李润培. SPAR 平台的发展趋势及其关键技术[J]. 海洋工程 2005.
- [2] 朱儒鑫. 深水开发中的海底管道和海洋立管. 船舶工业技术经济信息[J]. 2003,6(218):31—42.
- [3] Li Yousun. The Concept of Virtual Penetration and its Application in Risers with Multiple Contacts[R]. Oslo, Norway. OMAE.02 June, 2002, 23—28.
- [4] Euclides Trovato Neto, Claudio Ruggieri. Numerical Representation of the Collision Interaction Mass for Dual Risers Sys-

- tems[R]. Oslo, Norway OMAE. 02 June, 2002, 23—28.
- [5] Huse, Erling. Flow Interference and Clashing in Deep Sea Riser Arrays. Workshop on Vortex Induced Vibrations of Off-shore Structures[R]. WVIVOS-Escola Politécnica Universidade de São Paulo-Brazil, 2000.
- [6] 邵炎林, 何炎平. 海洋结构中典型圆管构件的碰撞损伤研究[J]. 中国海洋平台, 2006, 21(1): 36—40.
- [7] Wilmshurst S R, Chan H H, Ellinas C P. Mott MacDonald Ltd. Local Riser Impact; F. E. Model Validation Using Laboratory Impact Tests[R]. IOPEC 2001, Stavanger, Norway, June 17—22, 2001: 254—260.
- [8] Arve Johan Kalleklev, Kim J. Design Guideline for Riser Collision[R]. OTC 2003, Houston, Texas, U. S. A., 5 8 May 2003.
- [9] ABAQUS, Version 6. 2, Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc., 2001.
- [10] Chen K, Shen W Q. Further experimental study on the failure of fully clamped steel pipes[R], Int. J. Impact Engng. 1998, 21(3): 177—202.
- [11] Fontaine E, Heurtier J M, Toumit S. Modeling of Riser Contact-Friction Problems[R]. OTC 2002, Houston, Texas, U. S. A., May 2002, 6—9.

### (上接第 107 页)

1) 碰撞刚度变化对于撞击力有很大的影响, 随着碰撞刚度的减小, 撞击力迅速单调减小, 但挡块的变形逐渐增大。最大撞击力和变形是一对矛盾的参数, 分析表明柔性防撞装置的刚度取  $10^4 \text{ kN/m}$  量级时, 最大撞击力和变形均在可接受范围内, 具有较好的防撞效果;

2) 碰撞过程中必定伴有能量消耗, 忽略碰撞过程中的能量损失有时会大大高估了碰撞反应, 因此, 为得到一个合理的碰撞反应, 在分析碰撞问题时应当考虑碰撞过程中的能量损失;

3) 撞击力随间隙大小变化规律不明显, 受地震动输入的影响很大, 不同地震波作用下, 产生最大撞击力的间隙不相同, 初始间隙是一个不确定的影响因素;

4) 跨径的影响是各种因素的综合影响, 不仅受梁体质量大小和基本振动周期影响, 地震动的频谱特性也是一种重要影响因素, 但总体趋势是, 最大撞击力随跨径的增大而增大。

### 参考文献

- [1] Priestley M J N, Seible F, Galvi G M. Seismic design and retro-

fit of bridges [M]. John Wiley & Sons, Inc. 1996.

- [2] Hall John F. Northridge earthquake of January 17, 1994 reconnaissance report [J]. Earthquake Spectra, 1995, 11: 1—514.
- [3] Stavros A, Anagnostopoulos. Equivalent viscous damping for modeling inelastic impacts in earthquake pounding problems [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics. 2004, 33: 897—902.
- [4] 李建中, 范立础. 非规则梁桥纵向地震反应及碰撞效应 [J]. 土木工程学报, 2005, 38(1): 84—90.
- [5] 王军文, 李建中, 范立础. 非规则梁桥伸缩缝处的碰撞对地震反应的影响 [J]. 土木工程学报, 2006, 39(1): 54—59.
- [6] Shervin Maleki. Effect of side retainers on seismic response of bridges with elastomeric bearings. Journal of bridge Engineering [J]. 2004, 9(1): 95—100.
- [7] Shervin Maleki. Seismic modeling of skewed bridges with elastomeric bearings and side retainers [J]. Journal of bridge Engineering. 2005, 10(4): 442—449.
- [8] Robert Jankowski, Krzysztof Wilde and Yozo Fujino. Reduction of pounding effects in elevated bridges during earthquakes [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics. 2000, 29: 195—212.

### (上接第 114 页)

## 3 结论

在振动、语音等动态测试与分析系统中动态范围宽, 数据区间性明显, 数据冗余大, 为实现快速存贮和传输, 提出分段动态数据压缩算法, 它兼顾速度与压缩率指标, 在满足速度的前提下达到较高效率的压缩, 给出了算法的 C++ 语言描述及实际应用。该算法为动态线性压缩, 压缩和重构可同步进行, 算法的压缩和重构速度很快且开销极少, 可用于实时性较高、数据传输通道要求严格的场合, 亦可用于分布式数据采集系统中。上述算法在开发的以 DSP6713 为核心的动态数据采集与分析系统中实现, 数据压缩比约为 3:1, 额外时间开销约为 1%, 额外的空间开销为 1 帧数据的缓冲区。算法的进一步研究就是根据数据缓冲区的占用率决定压缩参数, 以动态算法结构来适应数据压缩, 使数据的压缩效率最优。

### 参考文献

- [1] 靳 鸿, 裴东兴, 祖 静. 无损数据压缩在数据采集系统中的应用探讨 [J]. 华北工学院学报, 2003, 1 v24.
- [2] 朱 琳, 罗家融, 田一海. 南昌核聚变实验数据采集系统中数据压缩算法的研究 [J]. 计算机工程, 2003, 2 v29.
- [3] Hou H S. A Fast Recursive Algorithm for Computing the Discrete Cosine Transform [J]. IEEE, Trans, On Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1987, 8(10): 1455—1461.
- [4] 庞晓东, 贾 凯. 一种高效的分布式测控系统的数据压缩管理方法 [J]. 计算机应用研究, 2004, 206—208.
- [5] Sorer J A. Data compression: Methods and theory [M]. [a. l.]: Computer Science Press, 1988, 81—121.
- [6] 颜景龙, 施聚生, 李国林, 李 浩. 降比特数据采集方法探索 [J]. 北京工业大学学报, 2000, 3 v20.
- [7] 赵建洋. 一种少数点 FFT 递归算法 [J]. 振动与冲击, 2006, 25(2): 48—50.
- [8] 赵建洋. 电网质量的 DSP 分布式计算机综合估计系统研究 [J]. 计算机与现代化, 2001, 6.