文章编号：1000－7598－(2008) 08－2252－05

精细积分法在地基震动响应分析中的应用

李渊印[1]，金先龙[1]，李根国[2]，李 治[1]

（1. 上海交通大学 高性能计算中心，上海 200030；2. 上海超级计算中心，上海 201203）

摘 要：精细积分法是求解结构动力响应问题的一种高精度算法，将其应用于地基震动响应问题的求解。在不影响算法精度的前提下，采用节省存储量的矩阵向量乘法和精细积分级数解，降低了精细积分法的存储需求。开发了地基震动响应分析程序，并对一重大工程的建筑地基进行了震动响应分析，通过与著名有限元分析软件 Nastran 的计算结果进行对比，证明前述方法和程序是正确的。

关 键 词：精细积分；地基；震动响应；软件开发

中图分类号：TU 435 **文献标识码**：A

Application of precise integration method to analysis of foundation vibration response

LI Yuan-yin[1], JIN Xian-long[1], LI Gen-guo[2], LI Zhi[1]

(1. High Performance Computing Center, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China; 2. Shanghai Supercomputer Center, Shanghai 201203, China)

Abstract: The precise integration method is a high precision algorithm for structural dynamic response. The method is applied to foundation vibration response. In order to reduce storage requirement, matrix-vector multiplication that saves storage, and series solution are adopted; moreover, the precision of precise integration method isn't affected. A corresponding program is developed for analysis of foundation vibration response. A building foundation of an important project is analyzed. The results are compared with the results of Nastran, a famous finite element analysis software; and correctness of above-mentioned methods and program is validated.

Key words: precise integration; foundation; vibration response; software development

1 前 言

地基的作用是承受建筑物基础传来的荷载，地基基础是保证建筑物安全和满足使用要求的关键之一。除了承载以外，地基还必须满足：变形不超过建筑物的允许变形值，保证建筑物不因地基变形而发生开裂、损坏或影响正常使用[1]。对于一些内置精密仪器设备（如电子直线加速器）的建筑结构，要求受周围干扰后产生的震动幅值为微米数量级，这些建筑物的地基对震动的要求更高。

地基震动响应问题的求解，可以采用时间步长直接积分法，如 Newmark 法、Wilson-θ 法、中心差分法等。文献[2]中提出了结构动力响应问题的另一种解法——精细积分法，该方法放弃了通常的差分格式，基于指数矩阵的精细计算，能够获得优于传统差分算法的数值结果[3]，精细积分法已经在结构动力分析、优化控制、偏微分方程的精细求解、非稳态随机动力学等领域得到了广泛应用[4]。

在结构分析中，为了保证数值解的精度，在用有限单元法离散化处理时往往要用大量的高阶单元将结构剖分得很密，这时相应的系统方程组的系数矩阵的阶数很高[5]。精细积分法求解此类问题会遇到困难，因为其自由度数比原问题大一倍，矩阵一般是满阵，需要大量的存储空间。本文阐述了精细积分法的原理，采用节省存储量的矩阵向量乘法和精细积分级数解，在不影响算法精度的前提下避开了满阵。在此基础上开发了地基震动响应分析的精细积分法程序，并将该程序应用于某重大工程的建

收稿日期：2006-12-04
基金项目：国家自然科学基金资助项目（No.60273048）。
作者简介：李渊印，男，1975 年生，博士，讲师，主要从事高性能计算和结构动力学分析等方面的研究。E-mail: yyli@sjtu.edu.cn

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

筑地基。通过与著名有限元分析软件 Nastran 的计算结果进行对比，证明了本文方法和程序的正确性。

2　精细积分法

结构动力方程的一般形式为

$$\left.\begin{aligned}&\boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{x}}(t)+\boldsymbol{C}\dot{\boldsymbol{x}}(t)+\boldsymbol{K}\boldsymbol{x}(t)=\boldsymbol{f}(t);\\&\boldsymbol{x}(t_0)=\boldsymbol{x}_0;\ \dot{\boldsymbol{x}}(t_0)=\dot{\boldsymbol{x}}_0\end{aligned}\right\}\quad(1)$$

式中：$\ddot{\boldsymbol{x}}(t)$、$\dot{\boldsymbol{x}}(t)$和$\boldsymbol{x}(t)$分别为加速度、速度和位移向量；$\boldsymbol{M}$、$\boldsymbol{C}$、$\boldsymbol{K}$ 和 $\boldsymbol{f}(t)$分别为质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵和节点载荷向量；$\boldsymbol{x}_0$和$\dot{\boldsymbol{x}}_0$分别为位移和速度初值；t为时间；t_0为初始时刻。

引入如下变换[6]：

$$\left.\begin{aligned}&\boldsymbol{v}(t)=(\boldsymbol{x}(t)\ \ \dot{\boldsymbol{x}}(t))^{\mathrm{T}};\ \boldsymbol{r}(t)=(0\ \ \boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{f}(t))^{\mathrm{T}}\\&\boldsymbol{H}=\begin{bmatrix}0&\mathbf{I}\\-\boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{K}&-\boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{C}\end{bmatrix}\end{aligned}\right\}\quad(2)$$

式中：$\mathbf{I}$为单位阵。式（1）可表示为

$$\dot{\boldsymbol{v}}(t)=\boldsymbol{H}\boldsymbol{v}(t)+\boldsymbol{r}(t);\ \boldsymbol{v}(t_0)=\boldsymbol{v}_0\quad(3)$$

式中：$\boldsymbol{v}_0$为向量初值。在有限元方法中，可以采用集中质量矩阵，此时 $\boldsymbol{M}$ 和 $\boldsymbol{M}^{-1}$为对角阵。又 $\boldsymbol{K}$ 和 $\boldsymbol{C}$ 稀疏且对称，故$-\boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{K}$ 和$-\boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{C}$ 也稀疏，从而 $\boldsymbol{H}$ 稀疏。式（3）可转化为同解的积分方程：

$$\boldsymbol{v}(t)=\boldsymbol{T}(t-t_0)\boldsymbol{v}_0+\int_{t_0}^{t}\boldsymbol{T}(t-z)\boldsymbol{r}(z)\mathrm{d}z\quad(4)$$

式中：$\boldsymbol{T}(\alpha)=\exp(\alpha\boldsymbol{H})$。文献[2]中给出了$\boldsymbol{T}(\alpha)$的 2^N 类精细计算方法，这里α为参数，N为正整数。

若把载荷的作用时域$[t_0,\ t_n]$分成 N 等份，各分点的值$t_k=k\tau$，这里$\tau=(t_n-t_0)/N$，$k=0$，1, …, N，τ为时间步长，则在时间步$[t_{k-1},\ t_k]$内，式（4）可以写成为

$$\boldsymbol{v}_k=\boldsymbol{T}(\tau)\boldsymbol{v}_{k-1}+\int_{t_{k-1}}^{t_k}\boldsymbol{T}(t_k-z)\boldsymbol{r}(z)\mathrm{d}z\quad(5)$$

式中：$\boldsymbol{v}_k=\boldsymbol{v}(t_k)$，$\boldsymbol{v}_{k-1}=\boldsymbol{v}(t_{k-1})$，$k=1, 2, \cdots, N$。

3　节省存储量的积分方程求解方法

3.1　指数矩阵的精细计算

根据矩阵指数函数的性质：

$$\exp(\tau\boldsymbol{H})=[\exp(\tau\boldsymbol{H}/m)]^m\quad(6)$$

记$\tau'=\tau/m$，m为正整数，其作用使τ'更小于τ。取$\exp(\tau'\boldsymbol{H})$的 Taylor 展开式前 3 项（若精度不够，可增大m或项数），有

$$\exp(\tau'\boldsymbol{H})\approx\mathrm{I}+\tau'\boldsymbol{H}+(\tau'\boldsymbol{H})^2/2=\mathrm{I}+\boldsymbol{T}_{\mathrm{a}}\quad(7)$$

式中：$\boldsymbol{T}_{\mathrm{a}}=\tau'\boldsymbol{H}+(\tau'\boldsymbol{H})^2/2$。

文献[2]中求解$\exp(\tau\boldsymbol{H})$的算法是，进行若干次矩阵自乘，得到的结果是满秩矩阵，存储量大。为此，不事先求出$\exp(\tau\boldsymbol{H})$，而是以$[\mathrm{I}+\tau'\boldsymbol{H}+(\tau'\boldsymbol{H})^2/2]^m$代入时程积分，矩阵向量乘在$[\mathrm{I}+\tau'\boldsymbol{H}+(\tau'\boldsymbol{H})^2/2]$的基础上进行。指数矩阵 $\boldsymbol{T}$ 与向量$\boldsymbol{v}$乘积的计算方法如下：

$$\begin{aligned}&①\ \exp(\tau'\boldsymbol{H})\boldsymbol{v}=[\mathrm{I}+\tau'\boldsymbol{H}+(\tau'\boldsymbol{H})^2/2]\boldsymbol{v}=\\&\qquad\boldsymbol{v}+\tau'\boldsymbol{H}\boldsymbol{v}+[\tau'^2\boldsymbol{H}(\boldsymbol{H}\boldsymbol{v})]/2\\&②\text{令 }\boldsymbol{v}=\exp(\tau'\boldsymbol{H})\boldsymbol{v}\text{，转①。}\end{aligned}\quad(8)$$

以上步骤共执行m次。

3.2　积分项的计算

对于任意载荷，式（5）右端第 2 项可采用分段线性化[2]、Fourier 展开[7]、直接积分[8]和级数解[9]等方法得到该项的数值结果。前两种方法需要矩阵求逆，第 3 种方法则是借助指数矩阵（不同于第 1 项中的指数矩阵）完成的，逆矩阵和指数矩阵都是满阵，需要大量的存储空间。在级数解的时程积分公式中，第 2 项求解仅与状态矩阵有关，而状态矩阵是稀疏的，故适合大型结构。级数解最初是为求解非线性结构动力方程而提出的，可直接将其应用于线性情况，而且更简化。

为了对式（5）进行积分，将$\boldsymbol{r}(t)$在t_{k-1}处展开成$(t-t_{k-1})$的 Taylor 级数：

$$\boldsymbol{r}(t)=\boldsymbol{r}_{k-1}+(t-t_{k-1})\dot{\boldsymbol{r}}_{k-1}+\cdots+\frac{(t-t_{k-1})^j}{j!}\boldsymbol{r}_{k-1}^{(j)}+\cdots\quad(9)$$

式中：$\boldsymbol{r}_{k-1}=\boldsymbol{r}(t_{k-1})$；$\dot{\boldsymbol{r}}_{k-1}=\dot{\boldsymbol{r}}(t_{k-1})$；$\boldsymbol{r}_{k-1}^{(j)}=\boldsymbol{r}^{(j)}(t_{k-1})$，$t\in[t_{k-1},\ t_k]$，$k=0, 1, 2\cdots$。

将指数矩阵$\mathrm{e}^{\eta\boldsymbol{H}}$也展开成如下的无穷矩阵级数：

$$\mathrm{e}^{\eta\boldsymbol{H}}=\mathrm{I}+\eta\boldsymbol{H}+(\eta\boldsymbol{H})^2/2!+\cdots+(\eta\boldsymbol{H})^m/m!+\cdots\quad(10)$$

式中：η为参数。

将式（9）和式（10）代入式（5）右端第 2 项，经过积分并整理可最后得到时程积分公式：

$$\boldsymbol{v}_k=\boldsymbol{T}(\tau)\left[\boldsymbol{v}_{k-1}+\sum_{j=0}^{\infty}\left(\sum_{m=0}^{\infty}\frac{(-1)^m\tau^{m+j+1}\boldsymbol{H}^m}{j!m!(m+j+1)}\right)\boldsymbol{r}_{k-1}^{(j)}\right]\quad(11)$$

利用式（11）和初值$\boldsymbol{v}_0$，可逐步求出各时刻的状态向量$\boldsymbol{v}_k$，无需回代。为避免满阵，通过$\boldsymbol{H}(\boldsymbol{H}(\boldsymbol{H}\cdots(\boldsymbol{H}\boldsymbol{v})\cdots))$计算$\boldsymbol{H}^m\boldsymbol{v}$（$\boldsymbol{v}$为向量）乘积。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

文献[9]已对该算法的误差进行了讨论，并给出了提高计算精度的合理做法，这些同样适用于式（11）。

记 $\max(j)=J$， $\max(m)=M$，式（11）中括号第 2 项可整理成，

$$\sum_{j=0}^{J}\left(\sum_{m=0}^{M}\frac{(-1)^m\tau^{m+j+1}\boldsymbol{H}^m}{j!m!(m+j+1)}\right)\boldsymbol{r}_{k-1}^{(j)}=$$

$$\sum_{m=0}^{M}\frac{(-1)^m\tau^{m+1}\boldsymbol{H}^m}{m!(m+1)}\boldsymbol{r}_{k-1}+\cdots+\sum_{m=0}^{M}\frac{(-1)^m\tau^{m+J+1}\boldsymbol{H}^m}{J!m!(m+J+1)}\boldsymbol{r}_{k-1}^{(J)}=$$

$$\sum_{m=0}^{M}\boldsymbol{H}^m\left(\frac{(-1)^m\tau^{m+1}}{m!(m+1)}\boldsymbol{r}_{k-1}+\cdots+\frac{(-1)^m\tau^{m+J+1}}{J!m!(m+J+1)}\boldsymbol{r}_{k-1}^{(J)}\right)\tag{12}$$

一般地，J 不必取太大的值，即可获得很好的精度[9]。为此，将式（12）整理成

$$\sum_{j=0}^{J}\left(\sum_{m=0}^{M}\frac{(-1)^m\tau^{m+j+1}\boldsymbol{H}^m}{j!m!(m+j+1)}\right)\boldsymbol{r}_{k-1}^{(j)}=$$

$$\sum_{m=0}^{M}\frac{(-1)^m\tau^{m+1}\boldsymbol{H}^m}{m!(m+1)}\boldsymbol{r}_{k-1}+\cdots+\sum_{m=0}^{M}\frac{(-1)^m\tau^{m+J+1}\boldsymbol{H}^m}{J!m!(m+J+1)}\boldsymbol{r}_{k-1}^{(J)}=$$

$$\sum_{m=0}^{M}\left(\frac{(-1)^m\tau^{m+1}}{m!(m+1)}(\boldsymbol{H}^m\boldsymbol{r}_{k-1})+\cdots+\frac{(-1)^m\tau^{m+J+1}}{J!m!(m+J+1)}(\boldsymbol{H}^m\boldsymbol{r}_{k-1}^{(J)})\right)\tag{13}$$

式中：m 共有$(M+1)$个取值，$m=i$ 时的计算能在 $m=i-1$时的计算结果基础上完成：

①计算 $\boldsymbol{H}^i\boldsymbol{r}_{k-1}^{(j)}=\boldsymbol{H}(\boldsymbol{H}^{i-1}\boldsymbol{r}_{k-1}^{(j)})$ $(j=0,1,\cdots,J)$，由于 $\boldsymbol{H}^{i-1}\boldsymbol{r}_{k-1}^{(j)}$ 已在 $m=i-1$时求出，共需$(J+1)$次矩阵向量乘；

②根据式（13）做$(J+1)$个向量 $\boldsymbol{H}^i\boldsymbol{r}_{k-1}^{(j)}$ 的线性组合，得到 $m=i$ 时的计算结果；

③存储$(J+1)$个向量 $\boldsymbol{H}^i\boldsymbol{r}_{k-1}^{(j)}$，令 $m=i+1$，转①。

可以证明：当 $M>2J+1$时，式（13）的计算量少于式（12）。一般情况下，$M>2J+1$成立。

4 地基震动响应分析程序的开发

借助 Nastran 二次开发工具 DMAP（direct matrix abstract programming），可以获取有限元模型的质量、阻尼、刚度矩阵及载荷-时间历程。为了节省空间和快速交换数据，以占空间最小的压缩二进制格式实现数据 I/O，DMAP 提供此接口。

根据前面介绍的积分方程求解方法，采用 Fortran 语言开发地基震动响应分析程序，其中包括质量、阻尼、刚度矩阵和载荷-时间历程的读入程序，以及计算结果的写出程序。式（11）中括号中第 2 项基于式（13）求解。

状态矩阵采用行压缩存储方式，即用 1 个浮点数组和 2 个整型数组来表示。其中浮点数组存储按 1 到 n 行排列的非 0 元素（这里 n 为矩阵总行数），第 1 个整型数组存储浮点数组中各元素所在的列号，第 2 个整型数组中的元素是每一行的开始在第 1 个整型数组中的索引号。

5 地基震动响应分析实例

本节利用上述程序对某重大工程的建筑地基进行震动响应分析，该工程要求受周围干扰后产生的震动幅值为微米数量级。

5.1 地基有限元模型

为了真实地模拟地基土，故采用分层处理。土的动力特性、土层的厚度以及土层的排列顺序都按照当地的实际情况建立全三维的有限元模型。

该重大工程结构的俯视图为圆形，建模时在地面上取该圆的同心圆，半径取 140 m，为结构圆半径的 1.55 倍。根据当地的土体材料参数，将有限元模型沿深度方向分成 17 层，每层又包括一至多层，共计 24 层单元，每层具有不同的材料参数。单元划分采用 8 节点六面体单元和 6 节点五面体单元，单元总数约为 8 万。整体有限元模型为一圆柱体，如图 1 所示。图中，对于工程结构的建造区域，在地基有限元模型中采用了相适应的单元划分，并用不同颜色标示，以便于可视化。

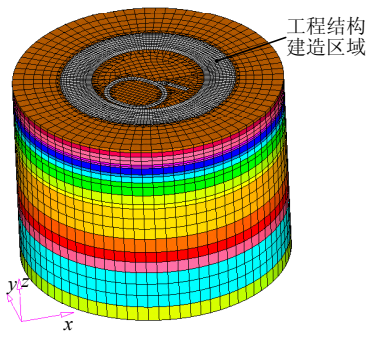


图 1 地基有限元模型

Fig.1 Finite element model of foundation

5.2 加载方式

在地面上，以建筑场地中心点为圆心，140 m 为半径画圆（上述模型正是选取了该圆周），在该圆周上取均匀分布的 6 个测量点，利用传感器采集

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

x，y 和 z 共 3 个方向的位移数据，采样周期为 0.005 s，共得到 18 条位移-时间历程曲线。

沿土体深度向下，位移逐渐衰减。垂直方向的位移按照 W(深度z)/$W(z=0)$ 衰减，而水平方向按照 U(深度z)/$U(z=0)$ 衰减。$W=-\mathrm{e}^{(-0.9607kz)}+1.801\mathrm{e}^{(-0.332\,8kz)}$，$U=-\mathrm{e}^{(-0.9607kz)}+0.575\ 7\mathrm{e}^{(-0.332\ 8kz)}$，其中 k 为波数，$k=0.051\ 9$，z 为土层深度。由此得到每一土层上 6 个单元节点（分别与地面上 6 个测量点的 x，y 坐标相同）的位移-时间历程。

根据每一土层上 6 个单元节点的位移-时间历程，进行线性插值，得到其所在圆周上其他节点的位移-时间历程。

加载时，对模型圆柱面上所有节点施加相应的位移-时间历程，对下底面上所有节点约束全部自由度。

5.3　计算结果分析

由上述有限元模型得到的结构动力方程阶数为 183 057，取时间步长 $\tau=0.005$ s。为验证精细积分法程序的正确性，利用本文程序和 Nastran 分别进行求解。分析计算结果，取地面圆心点的位移对比其结果如图 2~4 所示，可见本文程序和 Nastran 的计算结果很接近。

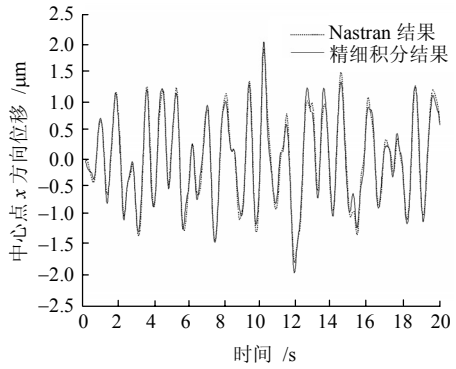


图 2　中心点 x 方向位移的对比

Fig.2　Comparison of x-displacement of center

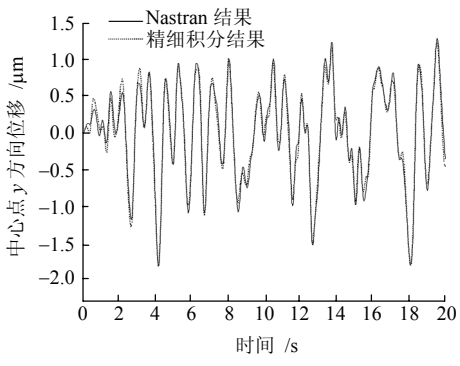


图 3　中心点 y 方向位移的对比

Fig.3　Comparison of y-displacement of center

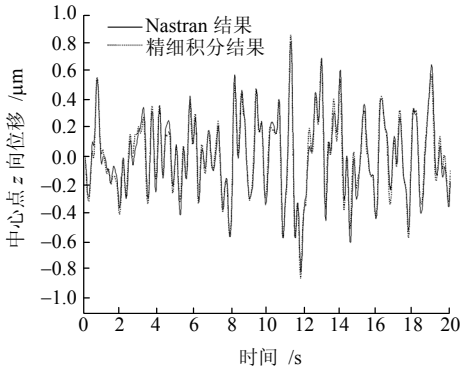


图 4　中心点 z 方向位移的对比

Fig.4　Comparison of z-displacement of center

6　结　语

精细积分法是求解结构动力响应问题的一种高精度算法，将其应用于地基震动响应问题的求解，是一项有意义的工作。

在不影响算法精度的前提下，采用节省存储量的矩阵向量乘法和精细积分级数解，降低了精细积分法的存储需求，有利于保证数值解的精度。

开发了地基震动响应分析程序，并通过 Nastran 获取模型的质量、阻尼、刚度矩阵及载荷-时间历程，使程序应用更加方便。

建立了一工程地基实例的全三维有限元模型，并对其进行了震动响应分析，结果分析证明本文方法和程序是正确的。

参 考 文 献

[1] 吴湘兴. 建筑地基基础[M]. 广州：华南理工大学出版社，1997.

[2] ZHONG W X, WILLIAMS F W. A precise time step integration method[J]. **Journal of Mechanical Engineering Science**, 1994, 208(6): 427－430.

[3] 吕和祥，于洪洁，裘春航. 精细积分的非线性动力学积分方程及其解法[J]. 固体力学学报，2001，22（3）：303－308.
LÜ He-xiang, YU Hong-jie, QIU Chun-hang. An integral equation of non-linear dynamic and its solution method[J]. **Acta Mechanica Solida Sinica**, 2001, 22(3): 303－308.

[4] 向宇，黄玉盈，曾革委. 精细时程积分法的误差分析与精度估计[J]. 计算力学学报，2002，19（3）：276－280，319.
XIANG Yu, HUANG Yu-ying, ZENG Ge-wei. Error analysis and accuracy design for the precise time-integration method[J]. **Chinese Journal of Computational Mechanics**, 2002, 19(3): 276－280, 319.

[5] 周树荃，梁维泰，邓绍忠. 有限元结构分析并行计算[M]. 北京：科学出版社，1994.

[6] TOMASZ Kucharski. A method for dynamic response analysis of time-variant discrete systems[J]. **Computers**

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

and Structures, 2000, 76: 545－550.

[7] LIN J H, SHEN W P, Williams F W. A high precision direct integration scheme for structures subjected to transient dynamic loading[J]. **Computers & Structures**, 1995, 56: 113－120.

[8] 沈为平，宋华茂. 任意荷载作用下结构动力响应的并行算法[J]. 振动工程学报，1996，9（4）：333－340.
SHEN Wei-ping, SONG Hua-mao. High precision direct integration method for structures subjected to arbitrary dynamic loading and its parallel implementation[J]. **Journal of Vibration Engineering**, 1996, 9(4): 333－340.

[9] 李金桥，于建华. 非线性动力系统精细积分下的显式级数解[J]. 四川大学学报（工程科学版），2002，34（2）：24－27.
LI Jin-qiao, YU Jian-hua. Explicit series solution under precise integration for nonlinear dynamics system[J]. **Journal of Sichuan University** (Engineering Science Edition), 2002, 34(2): 24－27.

《岩土力学》2008 年第 5 期被 EI 收录论文（55 篇，收录率 100 %）

No.	论文题名	作 者	页 码
1	复杂应力路径下堆石体本构模型比较验证	张宗亮，贾延安，张丙印	1147－1151
2	多孔介质中含均相/非均相反应传质过程数值模拟	武文华，李锡夔	1152－1158
3	基于等效塑性应变的边坡滑面搜索	孙冠华，郑 宏，李春光	1159－1163
4	正交各向异性剪切屈服准则研究及其数值实现	徐卫亚，张贵科	1164－1168
5	弹性介质边坡模糊有限元方法研究	蒋中明，徐卫亚，张新敏，等	1169－1173
6	应力释放法在隧洞开挖模拟中若干问题的研究	张传庆，冯夏庭，周 辉，等	1174－1180
7	CCL 吸附特性及孔隙率降低对污染物运移的影响	张金利，栾茂田，杨 庆	1181－1187
8	锚索桩设计计算的几个力学问题及有关概念探讨	蒋良潍，黄润秋，许 强	1188－1194
9	一个考虑循环荷载作用的简化模型	高广运，时 刚，顾中华，等	1195－1199
10	含软弱夹层土样变形破坏过程细观数值模拟及分析	张晓平，吴顺川，张志增，等	1200－1204
11	基于 MPSO 的 RBF 耦合算法的桩基动测参数辨识	郭 健，王元汉，苗 雨	1205－1209
12	跨断层埋地管道反应分析改进的 Newmark 方法	李小军，侯春林，赵 雷，等	1210－1216
13	渤海湾西岸滨海盐渍土的盐渍化特征分析	柴寿喜，杨宝珠，王晓燕，等	1217－1221
14	进化策略及其改进算法在深基坑支护优化设计中的应用研究	侯公羽，弭尚银，杨春峰	1222－1226
15	广义节点无网格法在土力学固结分析中的应用	栾茂田，叶祥记，杨 庆，等	1227－1232
16	一族线性屈服破坏函数对应的耗散势	白 冰，李小春，石 露，等	1233－1236
17	天津市区第一海相层粉质黏土卸荷变形特性的试验研究	郑 刚，颜志雄，雷华阳，等	1237－1242
18	双连拱隧道围岩变形有限元与 BP 神经网络耦合分析	张孟喜，李 钢，冯建龙，等	1243－1248
19	地下水位升高时黏性土无限边坡的水平位移	马崇武，刘忠玉，田 君	1249－1253
20	土石坝横向裂缝的土工离心机模型试验研究	张丙印，张美聪，孙 逊	1254－1258
21	利用内排土提高露天矿端帮边坡角的研究	朱玉生，贺永年	1259－1263
22	软黏土侧压力系数 K_0 阶段性特征研究	赵玉花，沈日庚，李 青	1264－1268
23	优化位移边界反演三维初始地应力场的研究	郭明伟，李春光，王水林，等	1269－1274
24	CFG 桩复合地现场试验及有限元模拟分析	黄生根	1275－1279
25	砾卵石层中预制桩的承载性状研究	刘俊龙	1280－1284
26	土工合成材料界面摩擦特性的室内剪切试验研究	徐 超，廖星樾，叶观宝，等	1285－1289
27	基坑支护支撑温度应力的有限元分析	陆培毅，韩丽君，于 勇	1290－1294
28	红层填料蠕变特性及工程应用研究	刘俊新，谢 强，文江泉，等	1295－1298
29	连拱隧道不同施工阶段结构体系可靠度计算	施成华，彭立敏	1299－1304
30	路堤侧向变形性状及预测模型研究	余 闯，刘松玉	1305－1309
31	露天与地下联合开采引起岩层移动规律的模型试验研究	黄平路，陈从新	1310－1314
32	水泥土桩联合土工格栅复合地基的离心模型试验研究	崔 溦，闫澍旺	1315－1319
33	碎石桩设计参数对复合地基抗液化性能的影响	张艳美，张鸿儒	1320－1324
34	分形节理岩体强度与变形尺度效应的试验研究	王谦源，李 晔	1325－1328
35	基于亚像素角点检测的试样变形图像测量方法	邵龙潭，董建军，刘永禄，等	1329－1333
36	基于 SURPAC 的复杂地质体 FLAC^{3D} 模型生成技术	罗周全，吴亚斌，刘晓明，等	1334－1338
37	基于择多算子的随机搜索法建立数字岩心的新技术	赵秀才，姚 军，衣艳静，等	1339－1344
38	三维边坡最不利滑裂面的遗传算法搜索	毛 谦，陈胜宏，彭成佳	1345－1350
39	基于案例的边坡治理方案选择决策支持系统研究	谢全敏，丁保艳，吴定洪，等	1351－1354
40	滑坡体三维地质建模与可视化分析	李明超，胡兴娥，安 娜，等	1355－1360
41	预应力锚索支护参数优化研究及在金川二矿区的应用	杨志强，高 谦，王正辉	1361－1366
42	乌鞘岭特长隧道复杂地质条件下断层带应力及变形现场监测分析	雷 军，张金柱，林传年	1367－1371
43	基于智能反分析的水布垭电站地下厂房机窝施工方案优化	姜谙男	1372－1376
44	东巨寺沟隧道湿喷纤维混凝土支护结构和围岩稳定性位移模糊判别	周太全，华 渊	1377－1381
45	北京地铁国贸站隧道周围土体的蠕变试验研究	李业龙，曾巧玲，肖军华	1382－1386
46	隧道建设对紧邻高架桥影响的三维数值分析	刘庭金，魏立新，房营光，等	1387－1390
47	基于三维有限元的地下连续墙深基坑逆作法施工方案设计	芮 瑞，夏元友	1391－1395
48	高速移动载荷作用下板式轨道-软岩路基系统的动力特性分析	卿启湘，王永和，赵明华，等	1396－1402
49	合－宁客运专线膨胀土不同高度路堤动力特性分析	杨永平，周顺华	1403－1406
50	某深水港土层固结系数反演及工后长期沉降预测	周 健，闫东霄，贾敏才，等	1407－1410
51	地铁盾构穿越建筑物施工位移的数值分析	夏元友，张亮亮，王克金	1411－1414
52	建筑物地基沉降曲线的分形特征分析	管志勇，路卫卫，戚 蓝，等	1415－1418
53	三峡库区滑带土抗剪强度参数的统计规律研究	李远耀，殷坤龙，柴 波，等	1419－1424
54	溪洛渡水电站某危岩体稳定性及加固措施研究	黄 达，黄润秋，裴向军，等	1425－1429
55	丹江口水库区岩石软化性能试验研究	徐礼华，刘素梅，李彦强	1430－1434

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net