

# 新型超声波钻探设备的建模分析

韩博<sup>1</sup>, 姜森<sup>2</sup>, 衣雪峰<sup>1</sup>, 李渊杰<sup>1</sup>

(1. 中水北方勘测设计研究有限责任公司, 天津 320222; 2. 中铁隧道勘测设计研究院有限公司, 天津 300133)

**摘要:**目前,对宇宙中生命迹象的探索是世界各国所关注的最重要的目标之一。美国宇航局研制了由超声波或者声波驱动器驱动的一系列超声波/声波钻头/取心器(USDC)设备,用来进行空间探测并提取岩石、冰与土壤样品,以及进行原位分析。此设备在声波频率下,超声波压电驱动器驱动中间的自由质量块,进而冲击钻头来进行采样。基于此设备的运行过程,分析了超声波激发器的原理过程,主要是自由质量块与激发器的反应过程,变幅杆顶部与自由质量块的碰撞过程,自由质量块与钻杆的碰撞过程。初步建立了USDC内部各部分相互作用的模型。

**关键词:**超声波/声波钻头/取心器(USDC);压电驱动器;自由质量块;变幅杆

**中图分类号:**P634.3 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2012)05-0034-05

**Modeling Analysis on a New Ultrasonic Drilling Device/HAN Bo<sup>1</sup>, JIANG Miao<sup>2</sup>, Yi Xue-feng<sup>1</sup>, LI Yuan-jie<sup>1</sup>** (1. China Water BEIFANG Investigation, Design & Research Co., Ltd., Tianjin 320222, China; 2. China Railway Tunnel Survey & Design Institute Co., Ltd., Tianjin 300133, China)

**Abstract:** At present, the search for existing or past life in the universe is one of the most important objectives of international society. For this purpose, effective instruments USDC that are driven by an ultrasonic/sonic actuator are being developed to probe and sample rocks, ice and soil, and conduct in-situ astrobiology analysis. At the ultrasonic or sonic frequency, free mass driven by ultrasonic piezoelectric driver impacts to the bit to samples. The principle of ultrasonic actuator is analyzed in this paper, including the interactions of free mass and actuator, the solid horn tip and free mass, free mass and drill stem.

**Key words:** ultrasonic/sonic driller/corer; piezoelectric actuator; free-mass; solid horn

## 0 引言

近年来,美国宇航局(NASA)的探测任务逐渐深入到太阳系内各行星的原位取样与分析。科学家们一直在研发可以同时进行取样与原位天文生物学分析的有效方法。目前的钻探技术受到诸多限制,如高轴力与保持扭矩的要求、不能有效循环工作的大功率消耗,并且这些技术需要沉重的设备。为了解决这些问题,JPL高级技术组和来自Cyberonics公司的工程师联合研发了超声波/声波钻头/取心器(USDC)<sup>[1,2]</sup>(如图1所示)。USDC设备需要的轴向力很小,因此它克服了在低重力环境中使用传统钻头进行行星取样的主要限制——高轴向力。此设备可以利用相对较小的力和相对较轻的金属工具就能够在硬岩、冰和密实土壤中进行艰难的钻进和取心任务。USDC具有以下功能:(1)钻进冰和各种岩石,包括花岗岩、闪长岩、玄武岩和石灰岩;(2)钻头不需要削尖;(3)在低温和高温下均可运行;(4)平均功率较低的情况下可以循环工作。



图1 最小轴向力下的USDC取心图

目前,正在进行研究的性能包括:探测以选择取样点,采集各种样品(包括岩心和钻屑),在低功率下采集硬玄武岩的长岩心,研究各种驱动器。

## 1 USDC的组成

该USDC装置主要由超声波驱动器、自由质量

收稿日期:2011-08-31

作者简介:韩博(1984-),男(汉族),陕西西安人,中水北方勘测设计研究有限责任公司,地质工程专业,硕士,从事勘测设计技术工作,天津市河西区洞庭路60号,hanbo1984@126.com。

块和钻头 3 部分组成(见图 1)<sup>[2]</sup>。其中,超声波驱动器是一个兰杰文振子,包括头部(前端)、尾部、压电片和电极片等零部件,通过一根螺栓紧固而成;自由质量块作为能量积蓄/转换部件;压电陶瓷片为 PZT-8 的纵振片。该装置在电极片上施加超声波频率的高频交流激励电压,利用压电材料的逆压电效应,驱使超声波驱动器产生超声频率的共振(主要指纵振),并通过其头部(前端)将振幅放大;自由质量块依靠驱动器的激励和振动耦合作用,在顶部与钻杆之间产生声波频率的往复碰撞;自由质量块的碰撞与冲击,传递到钻头与岩石接触界面,致使被钻介质破碎,达到钻取岩样的目的<sup>[3,4]</sup>。

图 2 为 USDC 设备示意图<sup>[6]</sup>。为了确定钻头控制和优化的关键性问题,需要研究设备内部各接触部分相互作用的模型。

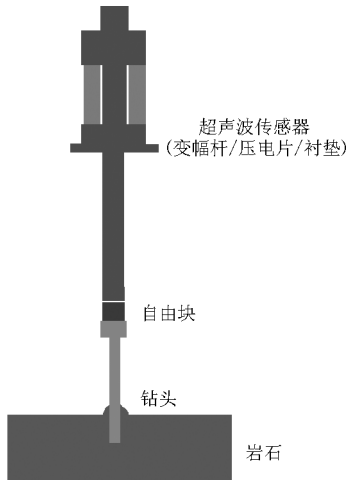


图 2 USDC 示意图

## 2 模型

针对超声波取心器的钻进过程,建立了 4 个相互作用的模型:(1)传感器与驱动电路;(2)自由质量块与变幅杆顶端;(3)钻杆与自由质量块;(4)岩石与钻杆底座。Bao 等<sup>[6]</sup>详细描述了各组件的程序。下面将只简述前 3 个过程。

### 2.1 传感器/超声波激发器

#### 2.1.1 原理

传感器/超声波激发器由一个 PZT-8 压电片组成,由预应力螺栓固定在变幅杆和衬垫之间。变幅杆靠其自身横截面的变化来增大振幅,分为“狗骨”状变幅杆、实变幅杆和台阶式变幅杆。传感器是一个横截面变化的混合纵向振动器,可以利用 Mason 等效电路建模<sup>[7]</sup>。为了使最终的传感器设计包含比较详细的工程资料,利用有限元法来确定这

种压电设备的全频响应。应用机电耦合元件<sup>[8]</sup>来模拟压电材料,可应用在商业软件 ANSYS<sup>TM</sup>中。

在此大功率超声波应用中,所设计制造的传感器需要有高机械度的  $Q$ ,并在或者接近第一个纵向共振频率下运行。利用模态分析可以隔离并集中研究此共振模式<sup>[9]</sup>,而且简化了模型,减少了计算时间。求解有限元方程广义特征值问题,可以得出共振频率和相应的模形。可得一系列的共振频率  $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$  和正规化模形(特征向量):

$$\{\xi_1\}, \{\xi_2\}, \dots, \{\xi_n\} \quad (1)$$

图 3 表示利用 ANSYS<sup>TM</sup> 计算的传感器第一个非零共振频率的模形。该模形大体上是一个变幅杆顶端(图 3 右侧)有更大位移的纵向振动。模形的求和位移表达式为:

$$\{\xi\} = \sum d_i \{\xi_i\} \quad (2)$$



图 3 模形

为了计算方便,可以把有限的方程转化为模态方程式并简化为 Bao 等<sup>[6]</sup>设计的一个等效电路:

$$(\omega_i^2 + j\omega R_i - \omega^2) d_i = p_i V + F_{mi}$$

$$Q = \sum_n p_i d_i + C_0 V \quad (3)$$

$$\{\xi\} = \sum d_i \{\xi_i\} \{F\} \\ (i = 1, 2, \dots, n)$$

式中:  $d_i$ ——模态  $i$  的振幅;  $Q$ ——电极上的电荷;  $R_i, p_i, F_{mi}$ ——分别是模态的有效阻尼、机电耦合和力。

$R_i$  和  $p_i$  可从有限元矩阵中解出来,  $F_{mi}$  的表达式为:

$$F_{mi} = \{\xi_i\}^T \{F\} \quad (4)$$

式中:  $\{F\}$ ——加在节点上的矢量力。

分析中只考虑第一个纵向模态。利用替代法,式(3)可变为:

$$(\omega_1^2 + j\omega R - \omega^2) d = pV + F_m \quad (5)$$

$$Q = pd = C_0 V$$

为了简化,上式中下标省略。

进一步简化式(5)表示该设备的响应,可利用图 4 所示的等效电路谐振响应,图中下标  $m$  表明该符号实际代表机械变量和参数。虚线框内的元件是电压驱动电路示意图。

经验证,有  $L_m = 1, C_m = \frac{1}{\omega_i^2}$ , 机械“电流” $I_m$  是模

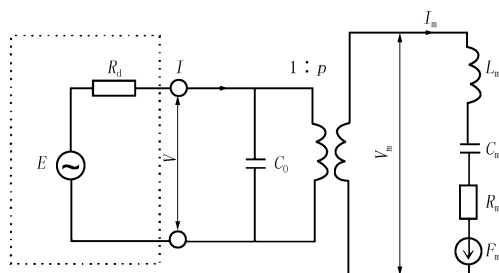


图4 传感器谐振等效电路的示意图

态速度。

$$I_m = \dot{d} \quad (6)$$

当电压驱动传感器且无机械约束(没有自由质量块的碰撞)时,模态速度可表示为:

$$I_m = \frac{pV}{j(\omega L_m - \frac{1}{\omega C_m}) + R_m} \quad (7)$$

### 2.1.2 自由质量块与传感器作用

在 USDC 的运行中,有一个小荷载,无论是重力还是弹簧预加力,作用于传感器来弥补变幅杆顶端与自由质量块之间的差距。这个力驱动传感器向下朝着自由质量块和钻头运动。在共振附近的某一个频率下,谐波电压驱动传感器。之后,通电的自由质量块与震荡的变幅杆顶端作用,在钻头和变幅杆顶端之间反弹,并在它们之间保持一定的间距。自由质量块对变幅杆顶端的碰撞影响变幅杆传感器的振动和转化运动。

#### 2.1.2.1 变幅杆传感器的转化运动

假设预加力是恒定的,并产生加速度  $a$ 。假定在时间  $t_1$  发生碰撞,接触时间非常短,接触力表达式为:

$$F_c = f_1 \delta(t - t_1) \quad (8)$$

在碰撞中,由动量守恒可得:

$$f_1 = -m\Delta v_1 \quad (9)$$

式中: $m$ 、 $v_1$ ——分别是自由质量块的质量和速度。

每次碰撞会导致变幅杆的质量速度中心(COM)改变:

$$\Delta U_1 = \frac{-m\Delta v_1}{M} \cdot H(t - t_1) \quad (10)$$

式中: $M$ ——变幅杆传感器的总质量; $H$ ——阶梯函数。

因此,传感器的 COM 速度变为:

$$U = U_0 + at + \sum \Delta U_1 \quad (11)$$

所以传感器的位移是速度的时间积分。

#### 2.1.2.2 恒定谐波电压驱动传感器振动

如图4所示,当电源电阻  $R_d$  为0时,传感器由恒定电压驱动。这种情况下,可以清楚地解释传感器的振动。从等效电路中,可以写出相应的微分方程:

$$L_m \ddot{d} + R_m \dot{d} + C_m d = pV + F_m \quad (12)$$

这个方程的解是电压  $V$  和机械力  $F_m$  引起的振动总和。谐波电压  $V = V_0 \exp(j\omega t)$  的不变解是:

$$I_{me} = \dot{d}_e = \frac{pV}{j(\omega L_m - \frac{1}{\omega C_m}) + R_m} \quad (13)$$

机械力由变幅杆顶端的自由质量块碰撞引起,从式(4)、(8)和(9)可得:

$$F_m = \xi_1 f \delta(t - t_1) = -m\Delta v_1 \xi_1 \delta(t - t_1) \quad (14)$$

式中: $\xi_1$ ——模态的顶端位移。

方程(12)对冲击力  $F_m$  的解是在冲击时间  $t_1$  后一个自由向下环的振荡,表达式为:

$$I_{mi} = \dot{d}_i = -\frac{m\Delta v_1 \xi_1}{L_m} \exp[(-\alpha + j\omega_f)(t - t_1)] \quad (15)$$

式中: $\alpha$ ——阻尼系数; $\omega_f$ ——自由振荡频率。

$$\alpha = -\frac{R_m}{2L_m} \quad (16)$$

$$\omega_f = \sqrt{\omega_1^2 - (\frac{R_m}{2L_m})^2} \quad (17)$$

模态速度的最后解是:

$$I_m = \dot{d} = \dot{d}_e + \sum \dot{d}_i = I_{me} + \sum I_{mi} \quad (18)$$

#### 2.1.2.3 带输出电阻的驱动器驱动传感器

通常,电驱动器的输出电阻不是0。电阻将减小输出电压、增加能量损失并改变由碰撞引起的振动特性。

前面相同的方法可用于驱动电路为非零输出阻抗的情况。这种情况下,驱动电压的恒定解是:

$$I_{me} = \dot{d}_e = \frac{\frac{pEZ_x}{R_d + Z_x}}{j(\omega L_m - \frac{1}{\omega C_m}) + R_m} \quad (19)$$

式中: $Z_x$ ——传感器的阻抗。

$$Z_x = \frac{j(\omega L_m - \frac{1}{\omega C_m}) + R_m}{j\omega C_0 [j(\omega L_m - \frac{1}{\omega C_m}) + R_m] + \frac{1}{p^2}} \quad (20)$$

碰撞解为:

$$I_{mi} = \dot{d}_i = -\frac{m\Delta v_1 \xi_1}{L_m} \exp[S(t - t_1)] \quad (21)$$

$S$  是(22)的解:

$$L_m C_m R_d C_0 S^3 + (L_m C_m + R_m C_m R_d C_0) S^2 + (R_m C_m + p^2 R_d C_m + R_d C_0) S + 1 = 0 \quad (22)$$

此三次方程有一个实根和一对共轭复数解。对于自由阻尼振动,解  $S$  的形式是:

$$S = -\alpha + j\omega_f \quad (23)$$

虽然有可能得到解的详细表达式,但表达式繁琐,而且在实际数值计算中不够精确。

#### 2.1.2.4 传感器和电驱动之间的相互作用

电源的输出功率  $P_E$  是源电压乘以电流的时间平均积分,表达式为:

$$P_{EI} = \frac{1}{T} \int_T E(t) I(t) dt \\ = \frac{1}{T} \int_T E(t) I_e(t) dt + \frac{1}{T} \int_T E(t) \sum I_l(t) dt \quad (24)$$

$$\text{或者} \quad P_E = P_{Ee} + P_{EI} \quad (25)$$

式(24)第一项,  $P_{Ee}$  是没有自由质量块荷载的功率,第二项  $P_{EI}$  是由自由质量块荷载引起的功率变化。 $I_e(t)$  是由于电驱电压的电流,而  $I_l(t)$  是由于自由质量块碰撞的电流,有:

$$I_e(t) = R_e \left[ \frac{E}{Z_x(\omega) + R_d} \right] \quad (26)$$

$$I_l(t) = R_e \left( \frac{p I_{ml}}{j\omega_f C_0 R_d + 1} \right) \quad (27)$$

电阻的功率损失  $P_d$  用时间平均功率计算:

$$P_d = \frac{1}{T} \int_T R_d [I(t)]^2 dt \\ = \frac{R_d}{T} \int_T [I_e(t) + \sum I_l(t)]^2 dt \quad (28)$$

应该注意到,在这些功率计算中,所有的电压和电流被表达为时间的实函数,并非它们的复杂表达式。此外,由碰撞引起的电流  $I_l(t)$  使时间减少,并在不同于驱动频率  $\omega$  的频率  $\omega_f$  下振荡。因此,式(24)和(28)的积分是个通式:

$$I_{nt} = \int \cos(at + f) \cos(bt + g) e^{-\alpha t} dt \quad (29)$$

## 2.2 变幅杆顶端—自由质量块的碰撞

变幅杆顶端—自由质量块碰撞用 2 种不同的方法进行模拟<sup>[10,11]</sup>。

### 2.2.1 第一种方法

用一个简单的碰撞模型来探索变幅杆/自由质量块驱动的基本机制。在这个模型中,假设能量损失和碰撞的持续时间忽略不计,并且变幅杆的质量远大于自由质量块。

规划电脑模拟程序,以跟踪自由质量块的位置,直到离开顶端振动范围。该程序计算自由质量块与

变幅杆相互作用之后的速度。自由质量块的末速度随振动阶段和初始速度值而变化。模型解释了当碰撞适当地同步时,多重碰撞就会变得可能。当忽略顶端速度时,虽然相互作用后的速度很可能小于初始速度,但计算结果显示,自由质量块与振动的变幅杆顶端相互作用之后,末速度平均地增加。

### 2.2.2 第二种方法

碰撞的有限元分析。如果包括变幅杆传感器总质量,变幅杆质量远大于简单碰撞模型中的自由质量块质量的假设就是正确的。然而,冲击波在撞击持续短时间内传播到变幅杆传感器的范围有限。传感器余下的部分实际上不涉及碰撞。因此,变幅杆质量比自由质量块大很多的假设可能不正确。为了探究真实的碰撞/驱动进程,建立有限元模型。

在模型中,变幅杆传感器被缩短  $\lambda/4$  长。在杆的另一端应用对称边界条件。切断是基于远离撞击点的结构差异将不会与自由质量块跳动过程有差异。从波传播的观点看,只要自由质量块在冲击波通过介质传播并且返回撞击点离开顶部表面之前,它不应该“感到”这个区域的结构差异。轴对称的固体元件用于表示变幅杆顶端。设置初始条件(节点的位移和速度)为典型的纵向振动值。

在碰撞后和碰撞持续期间,有限元法能够更准确地描述自由质量块的速度。与简单的碰撞模型相比,有限元法获得的最大速度更低。这表明变幅杆有限的有效质量。有限元法研究在简单的碰撞模型中不能被解释的两个现象,即碰撞过程中变幅杆的弹力和有效质量。于是建立弹簧—块体模型,该模型如图 5 所示为一个块体和 2 个弹簧表示变幅杆<sup>[14]</sup>。

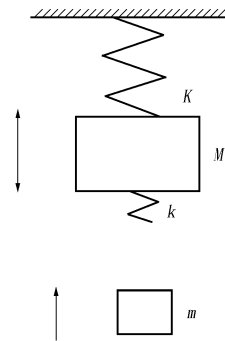


图5 弹簧—块体碰撞模型

块体  $M$  和下面的弹簧  $k$  的参数,利用有限元法获得的回弹速度和接触时间确定<sup>[15]</sup>。顶端弹簧系数  $K$  由变幅杆传感器的共振频率设置。发现结果与有限元的结果完全一致。因此,弹簧—块体模型

以合理的准确性提供了更有效的解,这是集成仿真程序所必需的。这种方法可用在 USDC 最终模型中。

### 2.3 自由质量块-钻杆碰撞

钻杆的工程模型由一个头部和一个细圆柱杆组成。自由质量块碰撞头部,并产生一个传向钻头末端的应力波。研究碰撞可利用类似于变幅杆顶部和自由质量块相互作用的有限元模型。为了避免底部反射波的干扰,钻杆长度是固定的,而且足够长。

## 3 简化计算机程序

可以开发一个计算机程序来模拟钻探系统的运行,包括变幅杆传感器、自由质量块、钻杆和电驱动器。该程序能够预测在各种初始条件下 USDC 的性能<sup>[16,17]</sup>。

在模拟中,假设当自由质量块返回并且碰撞钻杆时,由自由质量块碰撞引起的钻头振动减弱。忽略钻杆相对岩石的运动,因为与自由质量块的快速移动相比较,它非常缓慢。因此,每次碰撞钻杆的顶面被设置在相同的位置。

设置变幅杆与自由质量块的位置以及速度的初始值之后开始模拟。该软件跟踪变幅杆传感器和自由质量块平移运动,以及作为时间函数的变幅杆的振动。它预测自由质量块/变幅杆或自由质量块/钻头碰撞的时间和位置。使用前面所提及的模式确定的自由质量块/变幅杆或自由质量块/钻头碰撞的数据,模拟计算随时间的演变变量的变化。除了冲量和时间以外,一起记录碰撞所产生的运动和振动。

然后程序转入确定下一次碰撞。由电源提供传递给传感器的能量,同时被整合记录。该程序报告的统计资料包括:电输入功率,传递给钻杆的机械输出功率,自由质量块速度的平均值和分布,等等。

## 4 结论与建议

(1)为了将来进行地外行星探测与原位分析,对超声波/声波钻头/取心器(USDC)进行研究。为了能够有效地进行设计、改进并优化 USDC 性能,进一步开发分析了 USDC 内部各部分的作用原理与模型。

(2)USDC 内部各部分相互作用模型已经初步建立,还需要进一步地利用 ANSYS<sup>TM</sup>、C<sup>++</sup>、MATLAB<sup>TM</sup>等计算机软件建立程序包进行模拟,预测各组件的性能。

(3)为了提高设计性能,可以数值优化设计方法如遗传算法等,继续优化模型,为更加完善该设备做进一步的研究。

### 参考文献:

- [1] Bar-Cohen Y., S. Sherrit, B. Dolgin, et al. Smart-ultrasonic/sonic driller/corer; U. S. A., 6863136[P]. 2005-03-08.
- [2] Bao X., Y. Bar-Cohen, Z. Chang, et al. Modeling and Computer Simulation of Ultrasonic/Sonic Driller/Corer (USDC) [J]. IEEE Transaction on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control (UFFC), 2003, 50(9): 1147-1160.
- [3] 郭俊杰, 黄卫清, 李志荣. 一种新型的超声波/声波钻探器[J]. 压电与光电, 2008, 30(5): 579-581.
- [4] 毛志新, 刘宝林, 等. 一种便携式重力取样器的研制[J]. 地质科技情报, 2006, 25(6): 105-106.
- [5] Bar-Cohen Y., Sherrit, S., Dolgin, B., et al. Ultrasonic/Sonic Driller/Corer (USDC) for planetary application [J]. Proc. SPIE Smart Structure and Materials, 2001: 529-551.
- [6] Bao X., Y. Bar-Cohen, Z. Chang, et al. Ultrasonic/Sonic Impacting Penetrator (USIP) [J]. NTR Docket No. 41666, 2004-12-22.
- [7] Bar-Cohen Y., S. Sherrit. Self-Mountable and Extractable Ultrasonic/Sonic Anchor (U/S-Anchor) [J]. NTR Docket No. 40827, 2003-12-09.
- [8] S. Sherrit, X. Bao, Z. Chang, et al. Modeling of the ultrasonic/sonic driller/corer [A] USDC, 2000 IEEE Int. Ultrason. Symp. Proc. [C], 2000. 691-694.
- [9] Bao, X., Bar-Cohen, Y., Chang, Z., et al. Modeling and Computer Simulation of Ultrasonic/Sonic Driller/Corer (USDC) [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control (UFFC), 2003, 50(9): 1147-1160.
- [10] Bar-Cohen Y., S. Sherrit. Thermo couple on the-bit a real time sensor of the hardness of drilled objects [J]. NTR Docket No. 40132, 2003-02-01.
- [11] Bar-Cohen Y., S. Sherrit and J. L. Herz. Ultrasonic/Sonic Jackhammer (USJ) [J]. NTR Docket No. 40771, 2003-10-31.
- [12] Bar-Cohen Y., S. Sherrit, B. Dolgin, et al. Ultrasonic/Sonic Mechanism of Deep Drilling (USMOD) [J]. NTR, Docket No. 30291, 2001-07-17.
- [13] S. Sherrit, B. Dolgin, Y. Bar-Cohen, et al. Modeling of horns for sonic/ultrasonic applications [A]. 1999 IEEE Int. Ultrason. Symp. Proc. [C], 1999. 647-651.
- [14] H. Allik, T. J. R. Hughes. Finite Element Method for Piezoelectric Vibration [J]. Int. J. Num. Math. Eng., 1970, 2: 151-157.
- [15] Dolgin B., S. Sherrit, Y. Bar-Cohen, et al. Ultrasonic/Sonic Vibrating/Rotating Tool [J]. NTR Docket No. 30370, 2001-09-05.
- [16] Dolgin B., S. Sherrit, Y. Bar-Cohen, et al. Ultrasonic Rock Abrasion Tool (URAT) [J]. NTR Docket No. 30403, 2001-10-12.
- [17] Sherrit S., Y. Bar-Cohen, X. Bao, et al. Ultrasonic/Sonic Rock Powdering Sampler and Delivery Tool [J]. NTR Docket No. 40564, 2003-08-13.