

## 寻北仪用高精度动力调谐陀螺仪再平衡电路的设计

李正喜

江南航天集团第 3405 厂设计研究所, 贵州遵义, 563124

**摘要** 全姿态车载自动寻北仪是一项集精密机械、惯性技术、计算机和数据处理于一体的现代高科技产品, 其主要工作内容中重要的一项便是利用高精度陀螺仪敏感地球角速度分量, 高精度的陀螺必须配以高精度的再平衡电路才能组成高精度的陀螺仪。本文通过对寻北仪用某型动力调谐陀螺模型的系统分析和仿真, 初步确定了陀螺仪再平衡电路的主要参数, 并利用实际电路与陀螺进行试验, 确定了实现高精度陀螺仪再平衡电路的具体电路形式。

**关键词** 全姿态车载自动寻北仪 动力调谐陀螺 再平衡电路 高精度

### Design of Rebalance Loop of High Precision DTG for Northseeker

Li Zheng-xi, Gu Qing-hong

Design Institute of No. 3405 Factory, JiangNan Space Group, Zunyi 563124, China

**Abstract:** Full attitude auto-northseeker beared on vehicle is a modern high-tech product, which is integrated the technique of precision machine, inertial navigation, computer, and data process etc. One of their main operation is to detect the project of Earth angular velocity with high precision gyroscope, but such high precision gyroscope must have a high precision rebalance loop. A model of DTG used in northseeker is analysed and simulated systematically, and main parameters of rebalance loop in DTG are defined initially. Experiments are conducted by practical circuits and gyroscope, the concrete loop are defined and rebalance loop of DTG is achieved in practice.

**Keywords:** Full Attitude Vehicle-beared Auto-northseeker, Dynanically Tuned Gyroscope (DTG), Rebalance Loop, High Precision.

### 1 引言

全姿态车载自动寻北仪不仅用于战车和导弹初始对准的快速定位、定向, 而且还适用于无控火箭、自行火炮、车载雷达等武器装备的自动定向。寻北是关系到上述武器系统地面生存能力和命中精度的关键技术之一, 其主要工作内容中重要的一项便是利用高精度陀螺仪敏感地球角速度分量, 因此, 高精度的陀螺必须配以高精度的再平衡电路才能组成高精度的陀螺仪。

本文应用 MATLAB 软件, 先对某型动力调谐陀螺模型进行了系统分析和仿真, 初步确定了陀螺仪再平衡电路的主要参数, 然后利用实际电路与陀螺进行试验, 最终确定了实现高精度陀螺仪再平衡电路的具体电路形式。

### 2 陀螺仪系统分析和仿真

#### 2.1 陀螺仪系统分析

根据动力调谐陀螺原理, 其方框图如图 1 所

李正喜:江南航天集团第 3405 厂设计研究所第八研究室主任设计师。

示。

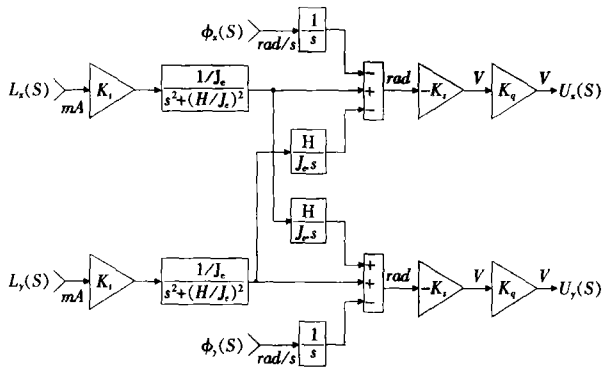


图1 动力调谐陀螺方框图

其中,

- H——陀螺转子的角动量;
- $J_e$ ——陀螺的赤道转动惯量;
- $K_i$ ——传感器的标度因数;
- $K_i$ ——力矩器的标度因数;
- $K_q$ ——前置放大器的放大倍数。

根据某型动力调谐陀螺的参数,其方框图如图2所示。

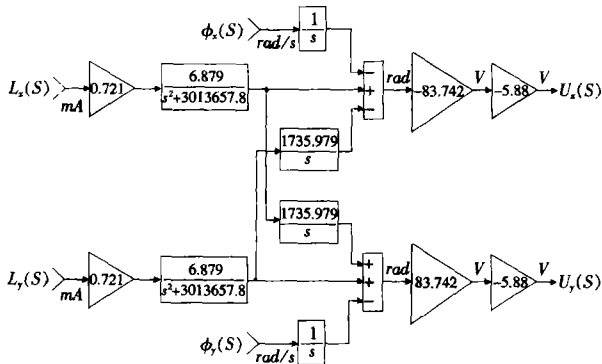


图2 动力调谐陀螺的方框图

我们知道,动力调谐陀螺由于磁场的耦合,两个输入轴会产生交叉耦合,在陀螺仪再平衡电路的设计中,常采用解耦电路来消除交叉耦合,使陀螺仪由一个双输入双输出系统变为两个单输入单输出系统。但是,在本寻北仪中,由于可以通过标定分离出交叉耦合系数,用软件进行解耦,因此,本电路不采用相对复杂的带解耦电路的动力调谐陀螺仪再平衡电路,而采用普通的动力调谐陀螺仪再平衡电路。

设再平衡电路单通道的传递函数为  $G(s)$ ,则动力调谐陀螺仪的方框图如图3所示。

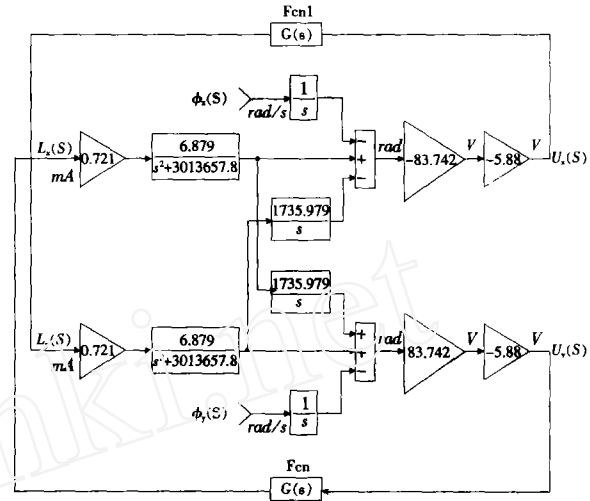


图3 动力调谐陀螺仪的方框图

为了减小陀螺本体漂移以及再平衡电路各元器件引起的漂移,提高陀螺仪的刚度和测量精度,本再平衡电路引入了PI校正,使陀螺仪由一型系统变为二型系统。同时,由于陀螺仪的标度因数大,达  $50V/(\circ)/s$ ,因此,采样电阻大,采样电阻上的干扰大。为了减小输出信号干扰,必须压低系统带宽,故采用了两级二阶低通滤波器。另外,考虑到马达旋转产生的  $166.7Hz$  的干扰,还采用了一级二阶带阻滤波器。因此,再平衡电路单通道的传递函数  $G(s)$  为:

$$G(s) = \frac{K(T_1s+1)(s^2+\omega_n^2)}{s(T_2s+1)(T_3s+1)(T_4s+1)(T_5s+1)(s^2+\frac{\omega_n}{Q}s+\omega_n^2)} \quad (1)$$

- 其中,  $G(s)$ ——再平衡电路单通道的传递函数;
- $K$ ——再平衡电路单通道的放大倍数;
- $T_1 \sim T_5$ ——校正网络的时间常数;
- $\omega_n$ ——二阶带阻滤波器的中心频率;
- $Q$ ——二阶带阻滤波器的品质因数。

### 2.2 陀螺仪系统仿真

用 MATLAB 软件进行仿真和优化,可以得到陀螺仪的方框图如图4所示。

由图4可见,单通道再平衡电路由四级校正网和一级功放电路组成,其传递函数  $G(s)$  为:

$$G(s) = \frac{98(0.33s+1)(0.9s^2+987355.26)}{s(0.005s+1)+(0.004s+1)(0.005s+1)(0.002s+1)(s^2+526.316s+1097061.4)} \quad (2)$$

根据图4,用 MATLAB 可以得到陀螺仪输出电压相对输入角速率的 Bode 图,如图5所示。

由图5可见,陀螺仪的谐振峰值  $M_r$  为

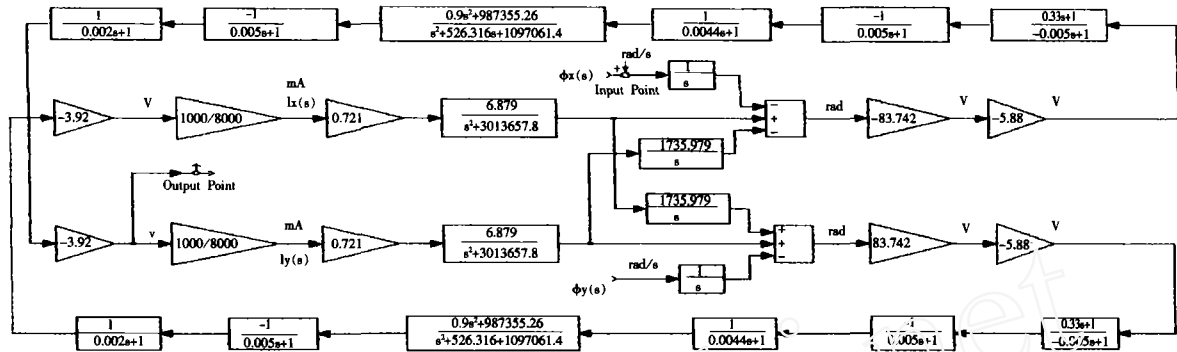


图 4 陀螺仪的方框图

1.7dB、带宽(-3dB)、 $f_c$  为 12.4Hz。陀螺仪输出电压相对输入角速率的单位阶跃响应如图 6 所示。

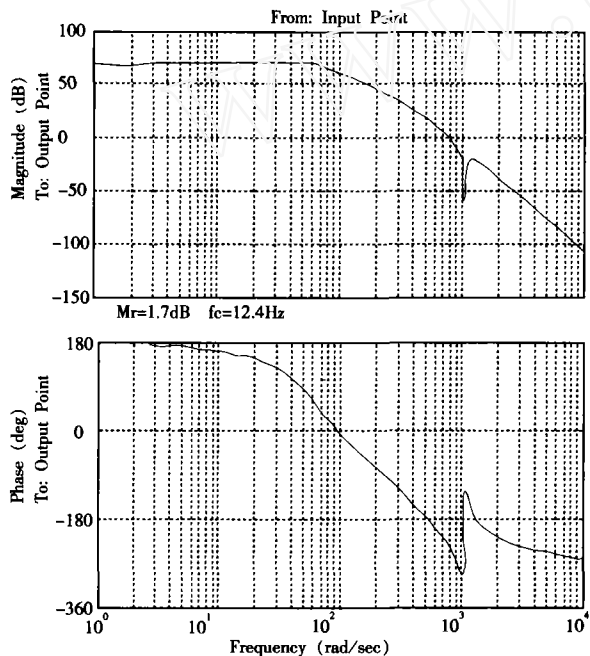


图 5 用 MATLAB 得到的陀螺仪输出电压相对输入角速率的 Bode 图

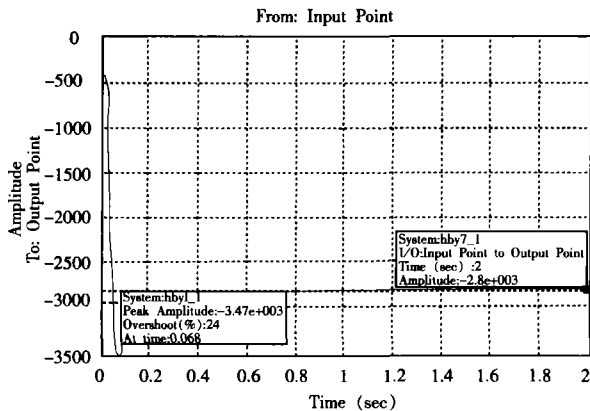


图 6 陀螺仪输出电压相对输入角速率的单位阶跃响应图

由图 6 可见，陀螺仪输出信号的超调量  $\sigma$  为 24%，稳态电压为 2800V，峰值电压为 3470V，则在输入为  $0.1(^{\circ})/s$  的阶跃信号下，陀螺仪输出信号的稳态电压为 4.887V，峰值电压为 6.056V。因此，采样电阻为  $8k\Omega$ ，陀螺仪标度因数为  $4.887V/(^{\circ})/s$ 。

陀螺转子偏角相对输入角速率的单位阶跃响应如图 7 所示。由图可见，在单位阶跃响应下，陀螺转子偏角峰值为 0.0284rad，在输入为  $0.1(^{\circ})/s$  的阶跃信号下，陀螺转子偏角峰值为  $0.00284^{\circ}$ ，即  $0.1704'$ ，小于动力调谐陀螺转子偏角限动角  $40'$ 。

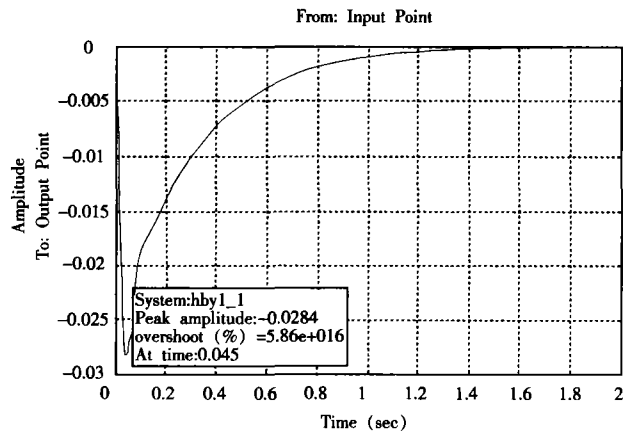


图 7 陀螺转子偏角相对输入角速率的单位阶跃响应图

### 3 再平衡电路的实现

根据上述仿真结果，可以确定该再平衡电路由相敏解调电路、校正网络、功放电路和模拟量放大处理电路四部分组成。

#### 3.1 相敏解调电路

动力调谐陀螺再平衡电路的相敏解调电路通

常采用 771 所的 LB8023/5 或 AD 公司的 AD598, 由于 LB8023/5 和 AD598 的价格比较高, 而且供货困难, 本电路根据相敏解调的工作原理, 相敏解调电路设计如图 8 所示。

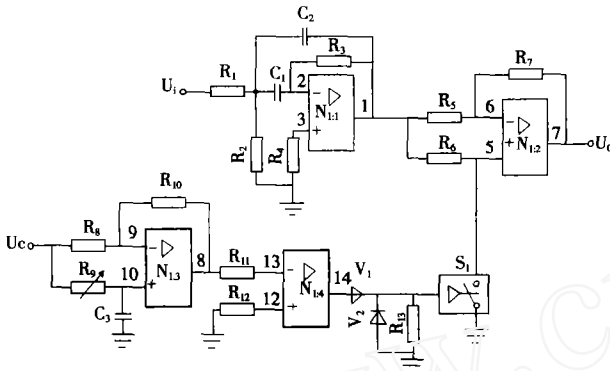


图 8 相敏解调电路图

图 8 中,  $N_1$  为四运放,  $S_1$  为模拟开关,  $V_1$ 、 $V_2$  为二极管。电阻  $R_1 \sim R_4$ 、电容  $C_1$ 、 $C_2$  和运放  $N_{1,1}$  组成一个二阶带通滤波器, 其中心频率为 16kHz, 用以滤除前放输出信号的干扰; 电阻  $R_5 \sim R_7$ 、模拟开关  $S_1$  和运放  $N_{1,2}$  组成整流电路, 对滤波后的信号进行解调; 电阻  $R_8 \sim R_{10}$ 、电容  $C_3$  和运放  $N_{1,3}$  组成滞后移相电路, 对 7V、16kHz 激磁信号  $U_c$  进行移相; 电阻  $R_{11}$ 、 $R_{12}$  和运放  $N_{1,4}$  组成比较器, 将正弦信号变为  $\pm 15V$  方波信号; 二极管  $V_1$ 、 $V_2$  和电阻  $R_{13}$  组成电平变换电路, 将  $\pm 15V$  方波信号变换为  $\pm 15V$  方波信号, 用以控制模拟开关  $S_1$  的接通和断开。取电阻  $R_3=2R_1$ 、 $R_5=R_6=R_7$ , 则该相敏解调电路的放大倍数为 1。

### 3.2 校正网络电路

由式(2)设计校正网络的电路如图 9 所示。

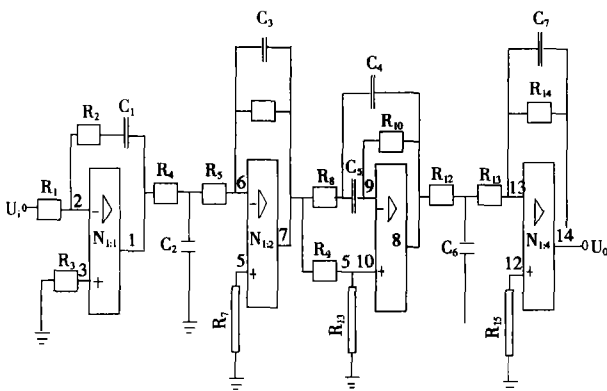


图 9 校正网络电路图

图 9 中, 该电路为四级校正环节, 第一级

为 PI 校正环节, 第二级为二阶低通校正环节, 第三级为二阶带阻校正环节, 其中心频率为 166.7Hz, 第四级为二阶低通校正环节, 各级校正环节的传递函数分别为:

$$G_1(s) = -\frac{R_2 C_1 s + 1}{R_1 C_1 s} \quad (3)$$

$$G_2(s) = -\frac{R_6 (R_6 C_3 s + 1)}{(R_4 + R_5) [(R_4 / R_5) C_2 s + 1]} \quad (4)$$

$$G_3(s) = -\frac{R_{11}}{R_7 + R_{11}} \cdot \frac{I_3 s^2 + R_{10} C_3 s^2 + [R_8 C_3 + R_9 C_3 + I_3 C_3 - R_{10} C_3 (R_1 + R_{11}) / R_{11}] s + 1}{I_3 C_3 R_{10} C_3 s^2 + [R_8 C_3 + R_9 C_3 + I_3 C_3 - R_{10} C_3 (R_1 + R_{11}) / R_{11}] s + 1} \quad (5)$$

$$G_4(s) = -\frac{R_{14} (R_{14} C_7 s + 1)}{(R_{12} + R_{13}) [(R_{12} / R_{13}) C_6 s + 1]} \quad (6)$$

则校正环节传递函数为:

$$G_j(s) = \frac{U_o(s)}{U_i(s)} = G_1(s) G_2(s) G_3(s) G_4(s) \quad (7)$$

对比式(2)和(7)可选取各元器件的具体参数。

### 3.3 功放电路

功放电路采用常规电路形式, 如图 10 所示。由图 10 可知, 功放电路的传递函数为:

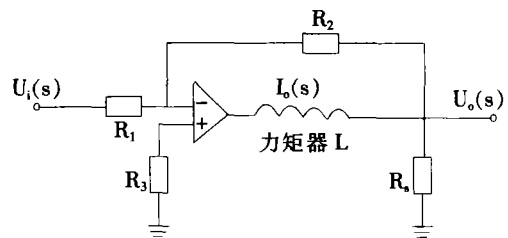


图 10 功放电路图

$$G_g(s) = \frac{I_0(s)}{U_i(s)} = -\frac{R_2 + R_4}{R_1 R_4} \quad (8)$$

### 3.4 模拟量放大处理电路

为了进一步滤除采样电阻上输出信号的干扰, 提高陀螺仪输出信号的稳定性, 提高测试精度, 对采样电阻上输出信号进行模拟量放大处理, 其电路如图 11 所示。

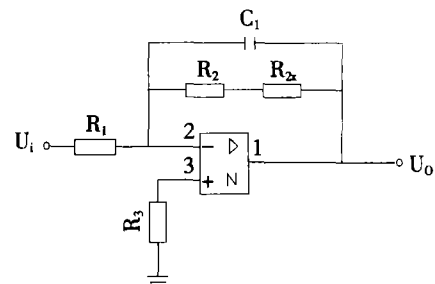


图 11 模拟量放大处理电路图

模拟量放大处理电路为一阶低通滤波器, 其传递函数为:

$$G(s) = \frac{u_o(s)}{u_i(s)} = -\frac{R_2}{R_1(R_2C_1s+1)} \quad (9)$$

#### 4 陀螺仪电路试验

根据上述仿真和电路设计, 用电路板按上述参数搭好电路, 与陀螺进行了试验, 测得陀螺仪 X 轴的 bode 图如图 12 所示, Y 轴的 bode 图如图 13 所示。

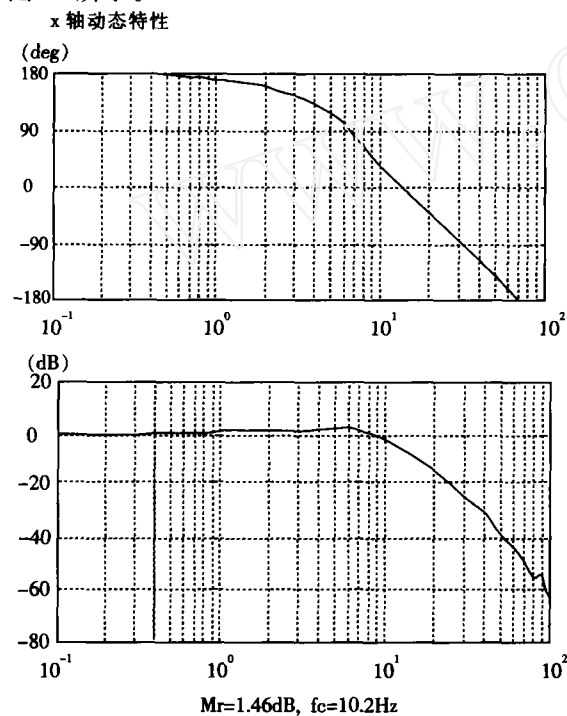
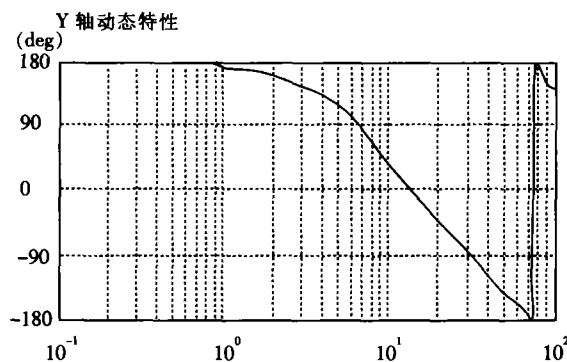


图 12 X 轴 bode 图



#### 参考文献

- [1] 潘荣霖 等. 飞航导弹惯性器件[M]. 宇航出版社, 1990.
- [2] 林士涛 等. 动力调谐陀螺仪[M]. 国防工业出版社, 1983.
- [3] 胡寿松. 自动控制原理(第三版)[M]. 国防工业出版社, 1994.

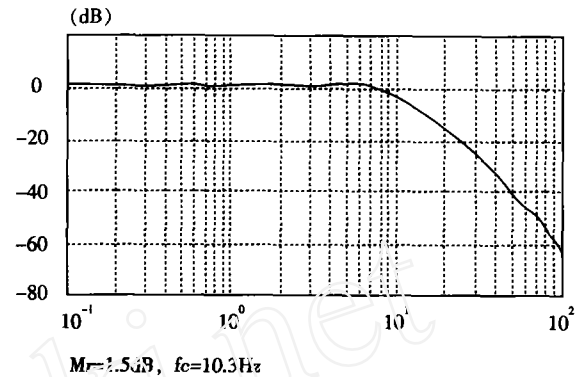


图 13 Y 轴 bode 图

由图 12 和图 13 可知, 陀螺仪的动态特性与仿真结果比较一致, 其谐振峰值分别为 1.46dB 和 1.5dB, 带宽分别为 10.2Hz 和 10.3Hz, 均满足寻北仪的要求。

通过对陀螺仪的速率试验, 测得陀螺仪在  $0.1^\circ/\text{h} \sim 0.1^\circ/\text{s}$  范围内的标度因数为  $48.872\text{V}^\circ/\text{s}$ , 非线性度为 0.01%, 其分辨率和阈值达  $0.1^\circ/\text{h}$ , 满足寻北仪的要求。

另外, 用多用表 HP34401A 测试采样电阻和模拟量放大处理电路输出信号的交流分量分别为  $30\text{mV}(\text{rms})$  和  $1.5\text{mV}(\text{rms})$ , 可见, 系统的干扰被控制在很小的范围内, 有利于寻北仪中信号采集和处理板对数据的采集。用多用表 HP34401A 直流电压读取模拟量放大处理电路输出信号, 其值稳定在  $\pm 0.1\text{mV}$  量级 (输入角速率为  $0.1^\circ/\text{h}$  时, 陀螺仪输出为  $0.69(\text{mV})$ , 可见, 其稳定性满足寻北仪的要求。

#### 5 结论

本文利用自动控制原理, 通过对陀螺仪系统的分析和仿真, 确定了高精度寻北仪用高精度、高稳定性陀螺仪再平衡电路的具体电路形式。本电路采用 PI 校正, 提高了陀螺仪的测试精度和稳定性, 而且线路简单, 目前正用于我厂某重点型号的寻北仪中。

(2004-09-22 日收)