



# 静电悬浮的变结构控制<sup>1)</sup>

晏磊 才德蓉

(清华大学精密仪器系 北京 100084)

## 摘 要

研究针对静电陀螺支承系统与精度有关的两大关键技术——消除起支击穿放电、可靠支承下减小预载,提出了连续变结构起支、拟线性变结构预载、绝对开方的变结构控制思想,设计出相应的变结构调节器、调制器及控制器,给出了边界面滑动模块区。实验效果良好。

**关键词:** 变结构控制, 静电支承系统, 起支调节器, 预载调制器, 开方控制器。

## 1 引言

静电支承系统<sup>[1]</sup>是高精度静电陀螺惯导装置的两大要素(悬浮支承, 定轴测角)之一, 它要把陀螺转子悬浮于真空球腔中, 承受 8g 以上加速度冲击、400Hz 范围的振动, 同时有亚微米量级转子定中精度(如转子失中度及分辨率均  $< 0.05\mu\text{m}^{[2]}$ )。这使实际系统有高达约  $10^6\text{N/m}$  的静态刚度或开环增益, 有约达  $10^3\text{V}$  的预载高压  $V_0$ 。上述状况导致如下问题:

1) 起支时高增益产生大超调(约 100~300%), 高预载产生小间隔过场强 ( $> 4 \times 10^7\text{V/m}$ ), 这些都会在球表面产生击穿放电黑斑, 降低球碗寿命, 给高精度测角带来直接危害。

2) 高预载抵御了最大外界冲击, 而正常工作时只有垂直方向承受 1g 重力加速度, 其它方向无加速度作用。这就使高预载下的系统功耗主要用于各相对电极预载力相互抵消上, 并产生大的漂移误差, 降低测角精度。

通常采用起支调节器改善起支特性, 但它只是在系统中加入局部环节加以控制, 却未能从起支规律上寻求一种直接的控制方法改变起动特性, 消除击穿。对预载研究有自适应预载、多级飞行支承、滑动模块控制等<sup>[3]</sup>, 都是改变或降低预载, 但引入干扰力矩变化或平方非线性控制, 使补偿漂移困难或系统增益逐增而失稳。因此, 应商定小预载并使大干扰下系统线性化。本文力图从控制规律上解决上述问题。

1) 国防科研基金资助课题。

本文于 1994 年 8 月 16 日收到

## 2 连续性变结构起支

单路支承电路如图 1, 其中变压器  $L$  为常数,  $d_1, d_2, c_1, c_2$  为上下电极间隙及对应电容, 则上、下电极总电容  $c_a, c_b$  及其谐振频率为

$$c_a = \frac{c + c_1}{2} = \frac{1}{2} \left( c + \varepsilon_0 \frac{s}{d_1} \right), \quad c_b = \frac{c + c_2}{2} = \frac{1}{2} \left( c + \varepsilon_0 \frac{s}{d_2} \right), \quad (1)$$

$$f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{Lc_a}}, \quad f_2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{Lc_b}}, \quad (2)$$

其中  $\varepsilon_0$  为真空介电系数,  $s$  为电极有效面积.

起支时上电极  $c_1 \uparrow c_a \uparrow f_1 \downarrow$ , 下电极  $c_2 \downarrow c_b \downarrow f_2 \uparrow$ . 将支承系统载波频率  $f$  由  $4 \times 10^4 \text{Hz}$  开始逐步降至工作频率  $2 \times 10^4 \text{Hz}$ , 这样  $f_1$  与  $f$  相近而使上电极处于谐振态, 电压大, 拉起球使  $c_1 \uparrow$ ; 而  $f_2$  与  $f$  相差远使下电极不会谐振, 电压小, 球上移使  $c_2 \downarrow$ . 控制  $f$  的变化速率就可控制小球上拉速度. 当小球因惯性上跳时,  $d_1 \downarrow f_1 \downarrow \downarrow$ , 偏离  $f, V_1 \downarrow \downarrow$ , 对应地  $V_2 \uparrow \uparrow$ , 从而限制住小球上跳. 由此实现了平稳起支.

上述方式对超调与机械抖动自动阻尼, 且对三维支承电路的每一路分别有效.

变频起支调节器的关键是构造一个带压控变阻器的振荡器. 起支时变阻器电阻由小到大, 振荡频率  $f$  由大变小. 到达工作频率时切换到工作恒频调节器. 为使变频起支与工作恒频平滑转换, 需在两者之间形成一个滑动模态区.

## 3 拟线性变结构预载调制器

系统框图如图 2, 其中  $X, Y$  为支承电极与转子中心偏移,  $K_1 C_1(s)$  为测量校正环节,  $K_{21}, K_{22}$  为乘法器及其它电路放大倍数,  $K_3$  为支承电压与力  $F$  的转换系数,  $K_4 C_4(s)$  为转子传递函数,  $K_5$  为比例因子, 取  $K_2 = K_{21} K_{22}, K_0 = K_{22} K_3$ , 且设  $V_0 \leq V_f < 0, V_f$  为调制信号  $V_s$  在结构切换时对应的  $\Delta V$  值, 且注意到  $V_s$  切换面为连续滑动模态, 则

$$V'_1 = \begin{cases} -K_5(V_0 + \Delta V), & \Delta V < -V_0, \\ 0, & -V_0 < \Delta V, \end{cases} \quad V'_2 = \begin{cases} -K_5(V_0 - \Delta V), & V_0 \leq \Delta V, \\ 0, & \Delta V < V_0, \end{cases} \quad (3)$$

$$V_s = \begin{cases} 1, & V_f \leq \Delta V \leq -V_f, \\ \sqrt{\frac{V_f}{\Delta V}}, & |V_f| < |\Delta V|, \end{cases} \quad (4)$$

$$V_1 = V'_1 V_s, \quad V_2 = V'_2 V_s, \quad (5)$$

$$F = F_1 - F_2 = K_0(V_1^2 - V_2^2),$$

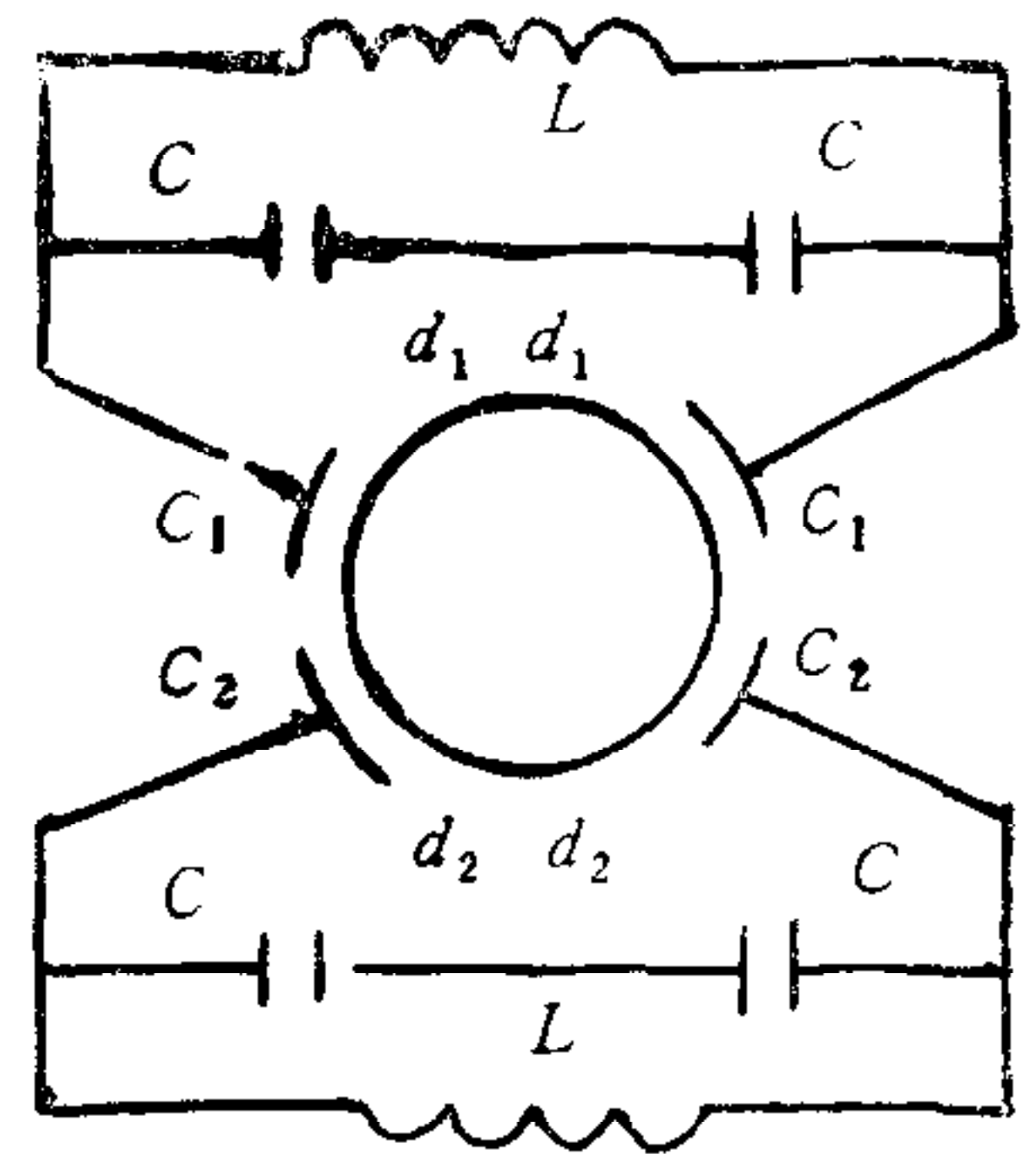


图 1 单路、静电支承电路原理

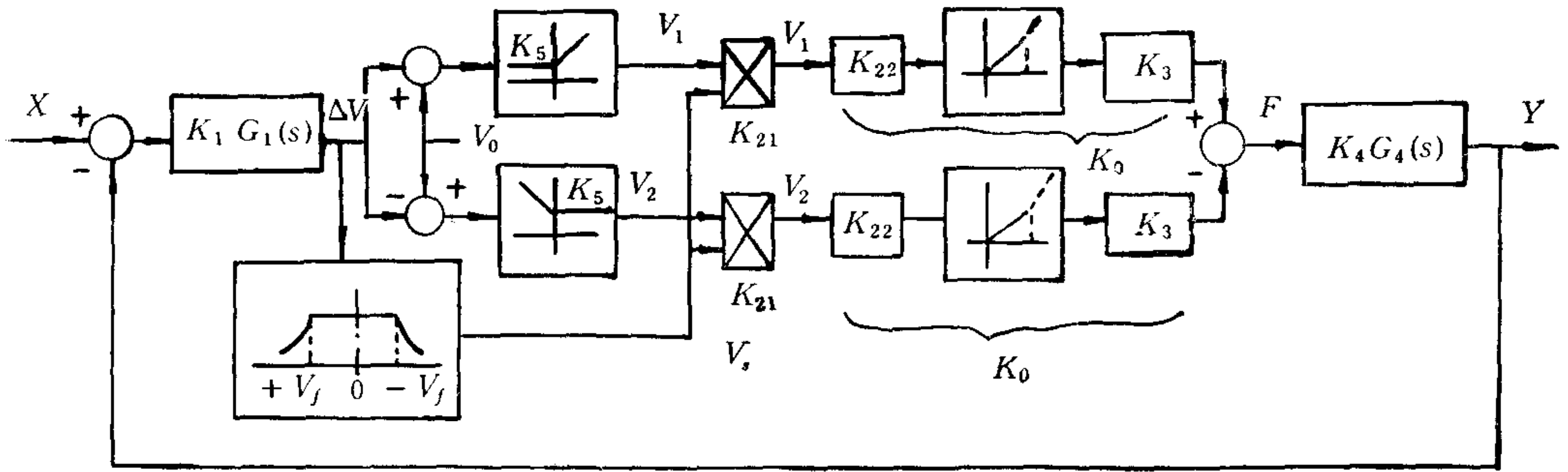


图2 变结构预载调制器控制框图

$$= \begin{cases} -\text{sgn}(\Delta V) \cdot K_5^2 K_0 V_f \left( \frac{V_0}{\sqrt{|\Delta V|}} + \sqrt{|\Delta V|} \right)^2, & |V_0| \leq |\Delta V|, \\ \text{sgn}(\Delta V) \cdot K_5^2 K_0 V_f \cdot 4 \cdot V_0, & |V_f| \leq |\Delta V| < |V_0|, \\ -K_5^2 K_0 V_0 \Delta V, & |\Delta V| < |V_f|, \end{cases} \quad (6)$$

式中  $\text{sgn}(\Delta V)$  为取  $\Delta V$  的正负号。由此得到控制律如图3所示。令  $|\Delta V| \geq |V_0|$  段与  $|\Delta V| < |V_f|$  段系数成比例

$$V_f = \frac{V_0}{2}, \quad (7)$$

则有图3知高加速度段斜率是  $[V_f, -V_f]$  段斜率的  $1/2$ ，这意味着系统开环增益并未因高加速度而增大，因此系统必然稳定。

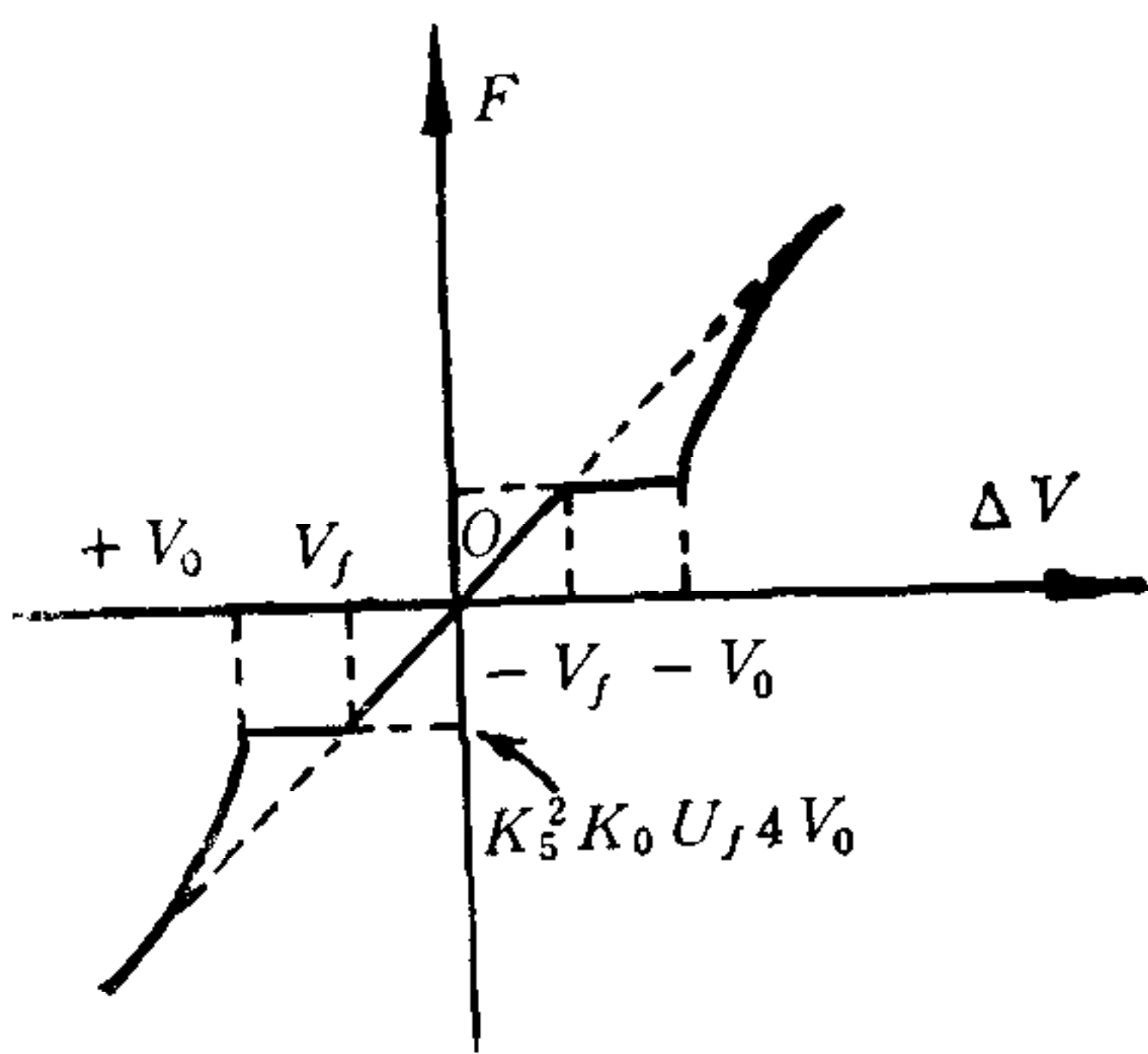


图3 变结构预载调制特性

### 4 绝对值开方的变结构控制器

该控制器是在静电支承系统被调制后进行电压开方，而不管调制前采用了何种结构的控制律。其实现电路是在图2的  $V'_1$  与  $V_1$ 、 $V'_2$  与  $V_2$  之间各加一开平方电路，而  $V_f$  与  $\Delta V$  无关，等于1。因而由式(5),(6)有

$$V_1 = \sqrt{V'_1}, \quad V_2 = \sqrt{V'_2}, \quad (8)$$

$$F = K_0(V'_1 - V'_2) = \begin{cases} -\text{sgn}(\Delta V) \cdot K_5 K_0 (|V_0| + |\Delta V|), & |V_0| \leq |\Delta V|, \\ -K_5 K_0 2\Delta V, & |\Delta V| < |V_0|, \end{cases} \quad (9)$$

显然系统是完全线性的。

进一步地，若去掉式(3)中  $|\Delta V| < |V_0|$  段线性调节区，且取  $V_f$  为  $\Delta V = 0$  时的基值电压，则

$$V'_1 = \begin{cases} -K_5(V_f + \Delta V), & \Delta V < 0, \\ -K_5 V_f, & 0 \leq \Delta V, \end{cases} \quad V'_2 = \begin{cases} -K_5 V_f, & \Delta V < 0, \\ -K_5(V_f - \Delta V), & 0 \leq \Delta V, \end{cases} \quad (10)$$

$$F = -K_5 K_0 \Delta V, \quad \Delta V \text{ 任意}, \quad (11)$$

即  $F$  与  $\Delta V$  为单一的线性表达式, 也是系统最简的变结构控制模式。当然为保证设计时的静态刚度, 此处开环放大倍数应设计得较大。

## 5 结语

连续性变结构起支调节器可以消除起支放电。拟线性变结构预载调制器通过调制信号的变结构控制, 用小预载实现大的承载能力, 降低了系统漂移误差, 高加速度时的开环增益不变, 从而使系统稳定。绝对开方的变结构控制使控制率最简, 且在所有工作段线性。实验表明, 这种变结构控制是成功的。

### 参 考 文 献

- [1] 晏磊等. 有源谐振静电陀螺支承系统的设计与实验研究. 中国惯性技术学报. 1994, 2(4): 40—41.
- [2] Yan L, Zhang T S, A capacitance sensor for micro displacement measurement, Proc. of 2nd Asian/Pacific Intern. Symposium on Instrumentation, Measurement and Automatic Control, 1993, International Academic Pub., 21—24.
- [3] Yang W Q, Zhang Y S, Electrostatic suspension system with slide mode control, *IEEE Trans. on Aeros. & Electro. Sys.*, 1992, 28(2):605—608.

## ELECTROSTATIC SUSPENSION SYSTEM WITH VARIABLE STRUCTURE CONTROL

YAN LEI CAI DERONG

(Dept. of Precision Instrument, Tsinghua Univ. Beijing 100084)

### ABSTRACT

Two improvements for the high-precision degree measurement of Electrostatic Suspended Gyro have been obtained in this paper: no electric-breakdown during initial-levitation process between rotor and its cavity, lower preload and constant open-loop gain in the whole regulation range for ESS(Electrostatic Suspension System). The achievements are based on the following considerations and designs: initial-levitation control with continuous variable-structure model, preload control with imitated-linear one, system control with absolute square-root one and all boundary layers with sliding model.

**Key words:** Variable structure control, ESS(Electrostatic Suspension System), initial-levitation regulator, preload modulator, square-root controller.