

变结构系统的频率域综合

单云生

(航天工业部二院)

摘 要

本文介绍了变结构系统的一种新综合法。它与已有的综合法不同,可以在突破线性系统所隶属的品质框框的意义上提高系统的静、动态控制精度,而且同时赋予系统高的鲁棒性。新法的运用在频率域内进行。

一、问题的提法

对于变结构系统的综合,至今,从根本上说,有如下两种方法:

(1) 以相轨迹为基础的综合法,即 Емельянов 方法^[1]。此法是专门为滑态中的变结构系统而建立的,而且为使变结构系统渐近稳定须分别解决三个问题,即象点落到转接线(面、超平面)的条件之满足,滑动在转接线(面、超平面)上存在的条件之满足以及滑动的渐近稳定性之保证。换言之,从工程上运用的观点来说,这种方法不能“一揽子”地解法系统稳定性问题。这正是该法在工程运用上不足之处。

此外,这种方法还假定滑态是理想的。诚然,这种理想滑态赋予系统对参数变化及外扰动的完全鲁棒性。但遗憾的是,由于转接函数的实现总带来延时和(或)滞后,所以理想滑态实际上总是不可达到的,可达到的总是实际滑态^[2]。在这种工作状态下,象点并不像在理想滑态中那样沿转接线滑行,而是沿该线穿行^[2]。这样,实际滑态和实际转接状态有共同点,即象点仅在离散的时间点上与转接线相遇,也就是说,系统在这两种工作状态下虽具有高的鲁棒性。但并非完全的鲁棒性。

Емельянов 方法仅追求鲁棒性,而完全不考虑系统的快速性。该方法的另一缺点在于,它不考虑实际滑态,因而也无法补偿其后果——伺服机构的“颤震”^[3]。

(2) 利用李亚普诺夫函数的综合法^[4]。该法的意图仅在于,相对于固定结构(即线性)系统提高快速性,而根本不考虑系统的鲁棒性。此法的根本缺陷在于其基本原理与利用此法所建立的系统对参数变化的敏感性以及与对象精确建模之必要性之间的不可调和的矛盾。

上述两种方法皆要求关于系统状态矢量的完全信息,即是说,基于这两种综合法的变结构系统之实现是困难的,尤其对于高阶系统。

待建立的新综合法应当克服和避免上述已知综合法的缺点,并以解决如下问题为目

标：

——突破线性系统所隶属的品质框框。在这个意义上，提高系统的静、动态控制精度。

——提高系统的鲁棒性。这里所指的鲁棒性是对稳定性而言，也就是说，是系统在对象参数变化和(或)参数不准确已知的情况下，保证某种最低限度的稳定裕度这种自适应性能。这导致“多模型控制问题”^[5]。

应该指出，线性控制器胜任不了这两项任务。

二、解 法

1. 变结构控制器的数学描述与其等效控制律

整个变结构系统，假设由一个线性对象和一个变结构控制器所组成。后者含有一个具有逻辑函数的逻辑环节以及用于信号变换的幅整形器和相整形器。假设逻辑函数 $\phi(\sigma, x_A)$ 和控制函数 y 取如下形式：

$$\phi(\sigma, x_A) = \begin{cases} W_1(D), & \text{当 } \sigma x_A > 0, \\ W_2(D), & \text{当 } \sigma x_A < 0, \end{cases} \quad (1)$$

$$y = \begin{cases} W_1(D)x, & \text{当 } \sigma x_A > 0, \\ W_2(D)x, & \text{当 } \sigma x_A < 0. \end{cases} \quad (2)$$

式中， x ——控制器的输入量(控制误差)，

D ——微分算子，

$W_1(D)$ 、 $W_2(D)$ ——算子变换式，

$$\sigma = W_\phi(D)X, \quad (3)$$

称为转接函数(相整形器的输出量)，

$$x_A = W_A(D)x \quad (4)$$

为幅整形器的输出量。

这里应当指出，与已有的综合法不同，实际转接函数中的延时和(或)滞后能够通过相整形器的算子变换式 $W_\phi(D)$ 顺便地得到考虑。

经过整理，逻辑函数和控制函数最后取如下形式：

$$\phi(\sigma, x_A) = W_0(D) + W_A(D)\text{sign}(\sigma x_A), \quad (5)$$

$$y = W_0(D)x + |x_A|\text{sign}\sigma. \quad (6)$$

这里假定：

$$\left. \begin{aligned} W_1(D) &= W_0(D) + W_A(D) \\ W_2(D) &= W_0(D) - W_A(D) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

对于特例 $W_0(D) = 0$ ，经谐波线性化得变结构控制器的幅相特性

$$\begin{aligned} |N(j\omega)| &= \frac{2|W_A(j\omega)|}{\pi} \left[\left(\frac{\pi}{2} - \varphi_\phi - \varphi_A \right)^2 + \sin^2(\varphi_\phi + \varphi_A) \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{\pi}{2} - \varphi_\phi - \varphi_A \right) \sin 2(\varphi_\phi + \varphi_A) \right]^{\frac{1}{2}}, \end{aligned} \quad (8a)$$

$$\angle N(j\omega) = \arctan \frac{\sin(\varphi_\phi + \varphi_A) \sin \varphi_\phi - \left(\frac{\pi}{2} - \varphi_\phi - \varphi_A\right) \sin \varphi_A}{\sin(\varphi_\phi + \varphi_A) \cos \varphi_\phi + \left(\frac{\pi}{2} - \varphi_\phi - \varphi_A\right) \cos \varphi_A}, \quad (8b)$$

式中 φ_ϕ 和 φ_A 分别为 $W_\phi(j\omega)$ 与 $W_A(j\omega)$ 的相角。

特例 $W_A(D) = 1$, 即 $x_A = x$, 正与 Емельянов^[1] 的问题提法相吻合。对于这种特殊情况, 控制函数为

$$y = W_0(D)x + |x| \operatorname{sign} \sigma. \quad (9)$$

式(6)与(9)表示变结构控制器的等效控制律, 并说明, 这种控制器可以理解为具有按变量 x_A 或 x 自整定的继电幅度的继电环节同另一环节 W_0 之并联。

2. 变结构控制器的设计

2.1 变结构系统的理想工作状态

变结构系统的理想工作状态应当是带蜕化运动的工作状态^[1] (以下简称为“边界状态”), 因为在这个状态中系统不仅具备完全鲁棒性, 而且也具有最好的快速性。与 Емельянов 单纯地追求滑态不同, 本文所报道的方法以近似地实现这种理想状态为目标。鉴于实际上边界状态由于始终存在的干扰而永远不可实现, 新方法只好满足于这样的转接线, 其斜率稍大于第二线性结构的双曲线渐近线^[1]的斜率, 致使系统工作在双曲线渐近线一侧的近旁。这种接近于边界状态的工作状态称为“准边界状态”^[2]。为达到这种工作状态, 必须对转接函数(式(3))中的延时和(或)滞后进行补偿。为此, 在原来的变结构控制律(式(9))中引入二次变结构(参阅下面式(10c))。它等效于在相位整形器中引入一个产生相位超前的“解析正回环”^[2]。

2.2 变结构系统频率特性之“塑造”

新综合法的控制器设计基于对系统开环幅相特性有的放矢的“塑造”。应当认识到, 系统的幅相特性与鲁棒性和快速性之间存在着确定的关系。开环幅特性在截止频率范围内的斜率绝对值, 简称为“特征斜率”^[2], 与鲁棒性有关, 即特征斜率愈大, 鲁棒性愈高^[2]。这是因为特征斜率愈大, 在对象参数变化时幅特性截止频率的变化就愈小, 因而系统的稳定裕度变化亦就愈小。人们用线性手段无法提高系统的特征斜率(众所周知^[6], 在线性系统综合时, 为了保证起码的相裕度, 幅特性在截止频率处的斜率力求被校正到 20 dB/dec)。因此, 在解决非稳态对象(例如飞机、导弹)控制问题时, 至今不得不满足于使用根据对象参数变化改变自动驾驶仪静态增益的方法来抵消幅特性截止频率的变化, 这种变增益方法包括“依照程序的增益自适应”^[7]和“依据飞行状态的增益自适应”^[8]。自然, 这两种控制方法与这里所讨论的鲁棒控制并不相干, 但它们在事实上标志着采取抵消截止频率变化的办法来达到维持稳定裕度这一思想至今为止的初步实践。

系统的快速性主要地取决于开环系统的相特性, 可通过“振荡倾向度”^[9]得到表达。

这里应指出, 应用变结构控制器可以达到 40dB/dec 以上的特征斜率^[2]。

于是, 控制器设计可归结为参照预期转接线(见上节)这样地确定控制器参数, 致使开环系统相特性不穿越对应于预期振荡倾向度的“相禁区”^[2]。

值得说明, 为了确定预期转接线须对高阶对象实施降阶。

2.3 控制器算法

变结构控制器的算法如下:

$$i_s[n] = K_y y[n], \quad (10a)$$

$$y[n] = |x[n]| \cdot \text{sign} \sigma[n], \quad (10b)$$

$$\sigma[n] = B_0 x[n-2] + m[n] + B_3 m_m[n] \cdot \text{sign}(\Delta m[n]), \quad (10c)$$

$$m[n] = B_1(x[n] + x[n-1] - x[n-3] - x[n-4]), \quad (10d)$$

$$\Delta m[n] = m[n] - m[n-1]. \quad (10e)$$

式中, K_y ——常数(功率放大系数),

i_s ——控制量(控制电流),

x ——控制误差,

m_m —— $m[n]$ 的瞬时振幅.

三、飞行器姿态控制系统作为应用例

1. 广义对象的描述与控制器设计结果

伺服机构与飞行器动力学构成一个四阶的广义对象. 基于针对时变系统通常采用的冻结系数法, 选择对于稳定性最恶劣的三个飞行状态(对应于三种对象模型). 这三种模型的频率特性相差之悬殊导致无法找到一个线性的“公用”控制器, 以满足这个变参数系统对鲁棒性的要求. 如果把参数的不准确性(即对象特性的极限状态)也考虑在内, 问题就更加严重了. 然而, 变结构控制器能够解决这个问题. 根据前面所述的设计原则, 获得这种控制器, 其频率特性如图 1 所示. 这里应加以说明, 鉴于这种非线性控制器实际上是被设计成为“伪线性”的, 即是说, 它的传递特性与信号幅度无关(参阅式(8)), 用频率特性这一术语取代描述函数是合理的.

控制器的参数如下:

采样周期: 10 msec , $B_0 = 1$, $B_1 = 7$, $B_3 = 0.5$, $K_y = 24$.

2. 系统数字仿真结果

系统的数字仿真证实了如下结论.

(1) 如果控制器仅采用一次变结构, 即在式(10c)中 $B_3 = 0$, 准边界状态由于转接函数 σ 中不可避免的延时与滞后(由式(10d)所决定的)无论如何也达不到. 实际上可达到的最好的动态行为如图 2 所示.

变结构系统在这种情况下是这样运动的: 它先处于滑态, 而且滑动的慢分量^[2]很大且衰减很慢; 接着, 系统过早地跃入转接状态^[1], 这导致过渡过程(图 2(b))带有相当大的

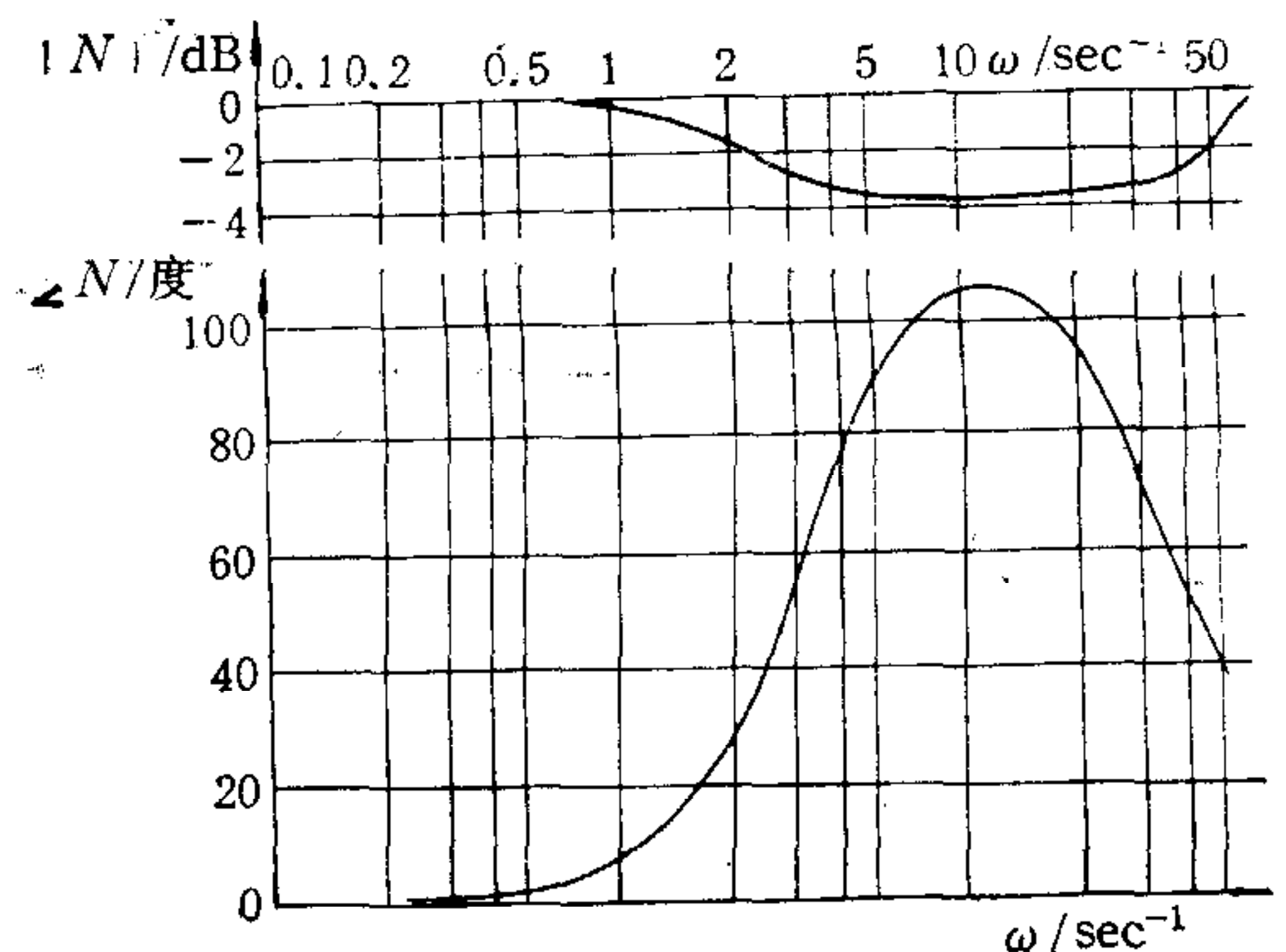


图 1 变结构控制器的幅相特性

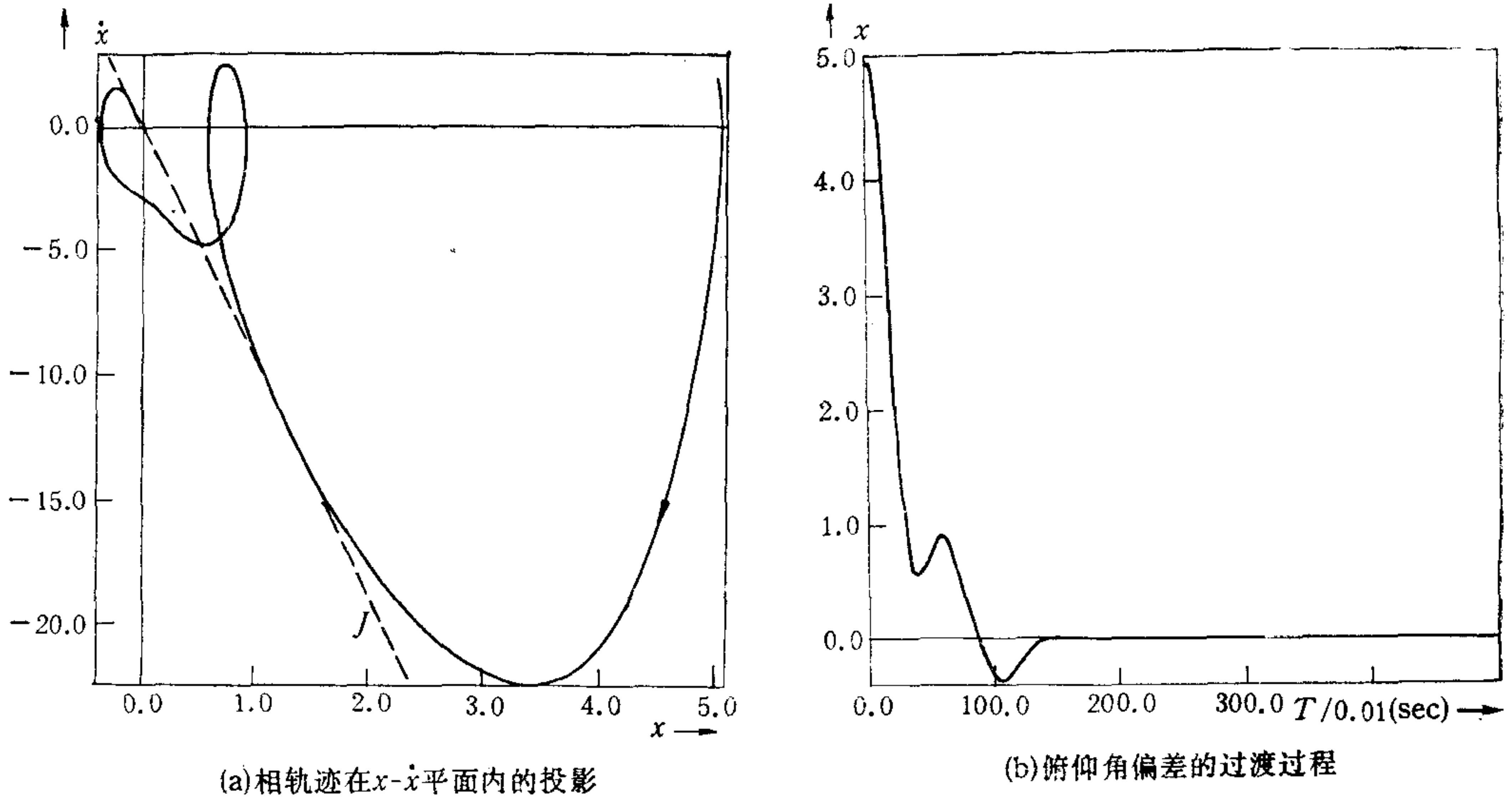


图 2 当采用一次变结构时在第一种飞行状态中系统可达到的最好动态行为

超调。从图 2(a) 看出，延时和滞后所造成的振幅过大的快分量^[2]妨碍转接线向双曲线渐近线 J 靠近，致使在后者的近旁建立相轨迹是不可能的。(2) 如果采用二次变结构，即 $B_3 > 0$ (式 10c)，则可对快分量进行可观的补偿，从而实现了准边界状态，如图 3 所示。

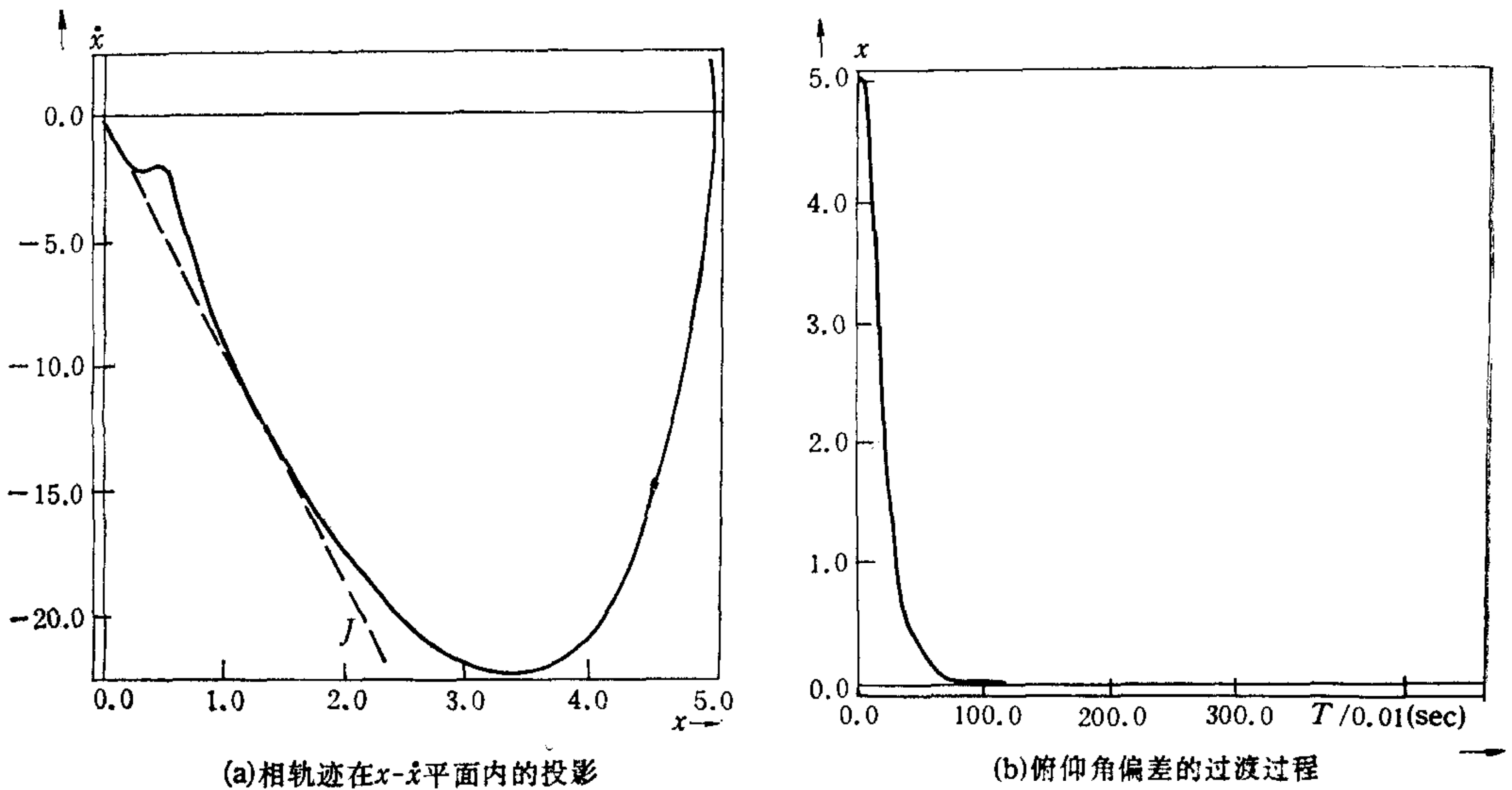


图 3 当采用二次变结构时在第一飞行状态中系统的准边界状态

可以看出，象点在双曲线 J 的近旁，几乎擦边式地奔向静止点。

所达到的控制品质，以振荡倾向度表示，对于所选定的三种飞行状态分别为 1.2, 1.3 及 2。

(3) 与线性姿态控制系统相比较，在达到明显更好的快速性同时，变结构控制器允许将系统开环增益(额定值)提高到两倍。这意味着静态控制精度得到相应的提高。

(4)系统的稳定域,以上边界与下边界开环增益值之比来表示。相对于线性姿态控制系统,对于三种飞行状态,至少分别扩展到了 9.5 倍、4.5 倍和 15.2 倍。可见,鲁棒性得到了相应的提高。

(5)控制算法(式(10))的实现,借助于微型计算机,是很简单的。

(6)关于对象状态矢量的不完全信息就满足控制器用于信号处理的需要了,如式(10)所表明。对于高阶对象,最高阶的差分只不过于 Δm (相当于二阶差分),而且该量以其符号函数(式(10c))进入控制方程,即是说,在实现时仅要求该量的正负号取正确。这对于系统的实现颇有意义。

致谢

本项研究工作是作者在联邦德国汉诺威大学自动控制研究所完成的。作者对国际自控联合会主席、该研究所所长 M. Thoma 教授对此项工作的热心支持表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Емельянов С. В., Уткин В. И. 等, Теория систем с переменной структурой, Наука, Москва, 1970.
- [2] Shan Y. (单云生), Entwurf von Strukturvariablen Reglern im Frequenzbereich, Dissertation Uni Hannover, 1985.
- [3] 钱学森,宋健,工程控制论,上册,科学出版社,1983,第 195 页.
- [4] Becker C., Synthese Strukturvariabler Regelungssysteme mit Hilfe von Ljapunov-Funktionen, Hochschul-Verlag, Stuttgart, 1979.
- [5] Ackermann J., Entwurfsverfahren für robuste Regelungen, Regelungstechnik, **32**(1984), 143—150.
- [6] Солодовников В. В., 自动调节原理,电力工业出版社,1957,第 471 页.
- [7] Baumeister J. K., Tendencies in flight control of large space launchers, Raumfahrtforschung, **14**(1970), 228—237.
- [8] Grübel G., Joos H. D. 等, Entwurf eines robusten back-up Reglers für ein Hochleistungsflugzeug, 见之于 Franke D. 主编: 4. Workshop über robuste Regelung in Interlaken, Regelungstechnik, **32**(1984), 167—171.
- [9] Пальтов И. П., Нелинейные методы исследования автоматических систем, Машиностроение, Москва, 1976.

SYNTHESIS OF VARIABLE STRUCTURE SYSTEMS IN FREQUENCY DOMAIN

SHAN YUNSHENG

(Second Research Academy, Chinese Ministry of Astronautics)

ABSTRACT

This paper presents a new synthesis method for variable structure systems. In opposition to the existing methods, it is possible to increase the steady-state and dynamic control accuracy, breaking through the performance limits to which linear systems are subject, and to endow the system with a higher robustness. The variable structure controller is designed in frequency domain.