

雷达天线近场测试系统中取样架的稳定性分析*

尚军平 毛乃宏 李 勇

摘要 取样架稳定工作是雷达天线测试系统的关键。因此，对取样架的结构稳定性进行了校验，对其控制系统稳定性进行了分析，并给出控制参数的取值域。在系统稳定性要求的控制参数范围内，系统可安全可靠地运行。

关键词 取样架 有限元 闭环控制 稳定域

中图分类号 TN820.2

The stability analysis of the scanning frame of the radar antenna near field testing system

Shang Junping Mao Naihong

(Research Inst. of Antenna and EM Scattering, Xidian Univ., Xi'an, 710071)

Li Yong

(The Qinghai Salt Lake Institute, the Chinese Academy of Sciences, Xining, 810081)

Abstract Whether the scanning frame can operate stably is very important for a radar antenna testing system. In this paper, the structure stability is calibrated. The stability of the control system is analysed, with the value range of the control parameter shown.

Key Words scanning frame finite element method close-loop control stability area

任何系统能实际应用的首要条件是系统必须稳定。在近场测试系统中，取样架完成取样探头对被测天线在取样范围内的扫描运动。通常，对一付天线的测试，取样架需做几小时甚至十几小时的扫描运动。若在测试中发生一次故障，全部测试数据将无效。因此，取样架的稳定性、可靠性就显得特别重要。

1 取样架系统的结构

取样架由一长9 m，重约12 t的水平床身和一高9 m，重约4 t的桁架立柱组成(如图1)。设计参数如下：

(1) 水平方向最高运行速度为13.7 cm/s；

- (2) 垂直方向最高运行速度为17.2 cm/s ；
- (3) 控制定位精度为0.03 mm ．

控制部分是由交流伺服驱动器、交流伺服电机、滚动光栅组成的闭环系统(如图2)，应用积分分离的PI控制算法 ．

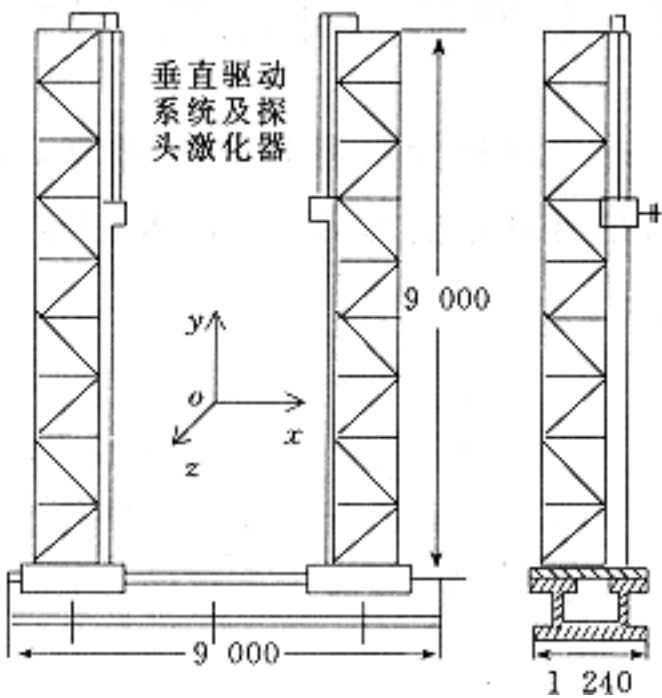


图1 取样架结构简图

2 结构的稳定性校验

水平床身采用一长9 m、重约12 t，经过长时效的铸铁床身．经过精加工后作为水平导轨，其强度可靠，稳定性好，在水平运动中导轨的变形小，可满足测试要求．竖直立柱是一个大桁架结构，在扫描过程中整体移动，因此需用有限元法对其进行动态和静态校验．

对空间刚架结构，利用矩阵位移法进行结点位置量的计算，表达式为

$$K \cdot \Delta = F,$$

(1)

式中K是结构材料刚度矩阵， Δ 是所求结点的位移量，F是分解到各个结点处的重力．

K，F由取样架结构设计的参数确定，再利用约束条件解式(1)求各结点的位移 Δ ，进而求出支座反力、单元内力．具体计算过程见文献[1]．然后对桁架的各杆件进行强度校核．校核结果均满足要求，不会发生失稳现象．

为了保证取样架在两坐标方面的垂直度，防止变速运动过程中的颠覆，要对动态条件下立柱最大倾斜进行校核，倾斜量 θ 为

$$\delta = \frac{L(S_{\max} - S_{\min})}{B} ,$$

(2)

其中 S 表示接触变形量， L 是 y 方向扫描尺寸， B 为立柱接触长度($B=1.2\text{ m}$)， S 的求解可查阅文献[1]。计算结果为

$$x=0.097\ 35\text{ mm} \cdot 0.5\text{ mm}/8\ 000\text{ mm} , \quad z=0.475\text{ mm} < 0.5\text{ mm}/8\ 000\text{ mm} .$$

3 控制系统稳定性分析

该取样架采用PI位置控制，其系统控制框图如图3。被控对象为交流伺服电机，时间常数为 T_m ，系统的开环增益为 $K=K_C K_M K_E$ [2]，式中 K_C 为伺服放大器增益， K_M 为机械部分增益， K_E 为滚动光栅增益 [3]。

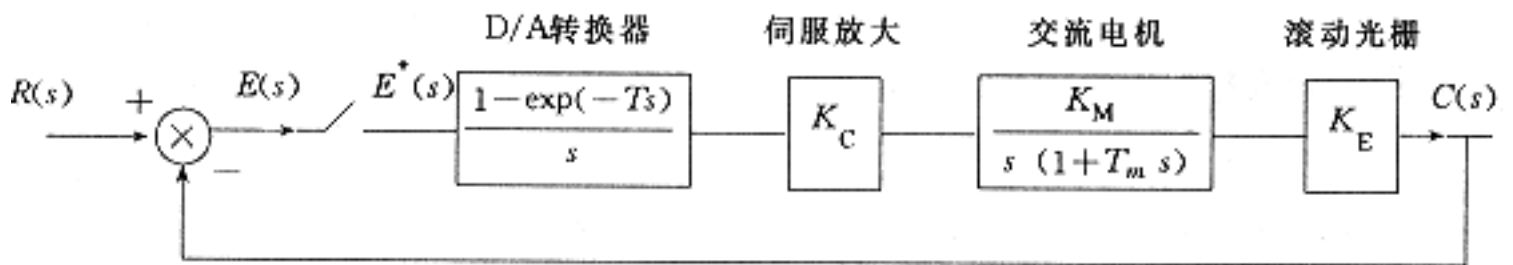


图3 系统控制图

受控系统的传递函数为

$$G(s) = \frac{1 - \exp(-Ts)}{s} \cdot \frac{K_M}{s(1 + T_m s)} .$$

(3)

因控制器具有离散时间的特点，此传递函数可通过 Z 变换用脉冲传递函数表示

$$G(Z) = K \cdot \gamma \cdot T \frac{(Z + \beta)}{(Z - 1)(Z - \alpha)} ,$$

(4)

式中 α , γ , β 全部采用周期 T 和时间常数 T_m 的比值(T/T_m)表示 ,

$$\begin{cases} \alpha = e^{-T/T_m} , \\ \gamma = 1 - (1 - \alpha) \cdot \frac{T}{T_m} , \\ \beta = \frac{1}{\gamma} [(1 - \alpha)] \frac{T}{T_m} - \alpha \end{cases} .$$

(5)

控制器的传递函数为 $D(S) = K_P + \frac{K_I}{S}$.

(6)

将 $D(S)$ 进行 Z 变换 , 得到相应的脉冲传递函数

$$D(Z) = \frac{(K_P + K_I) Z - K_P}{Z - 1} ,$$

(7)

因而可形成闭环传递函数 $G_B(Z) = \frac{G(Z)}{1 + G(Z) D(Z)}$.

(8)

由特征方程 $1 + G(Z) D(Z) = 0$, 得 :

$$Z^3 + A Z^2 + B Z + C = 0 ,$$

(9)

式中

$$\begin{cases} A = K \cdot \gamma \cdot T (K_r + K_z) - \alpha - 2, \\ B = 2\alpha + 1 + K \cdot \gamma \cdot T (B K_p + B K_z - K_p) \\ C = -(\alpha + K \gamma T \beta K_p) \end{cases}.$$

由稳定性判定条件知, 要稳定特征方程的根, Z_j 均位于Z平面以原点为中心的单位圆内, 即 $Z_j < 1$. 但由于方程(9)的解不易得到精确表达式, 根据线性离散系统在Z平面的稳定条件可转换为w平面的Routh稳定判据, 不求解特征方程所有根.

采用w变换, $Z = \frac{1+w}{1-w}$, 得

$$(1+A+B+C)w^3 + (3+A-B-3C)w^2 + (3-A-B+3C)w + (1-A+B-C) = 0,$$

(10)

令

$$\begin{cases} \hat{K}_1 = K \cdot K_1, \\ \alpha_3 = 1 + A + B + C = \gamma T (1 + \beta) \hat{K}_1, \\ \alpha_2 = 3 + A - B - 3C = \gamma T \cdot [(2 + 2\beta) \hat{K}_p + (1 - \beta) \hat{K}_1], \\ \alpha_1 = 3 - A - B + 3C = 4 - 4\alpha + \gamma T \cdot [4\beta \hat{K}_p + (1 + \beta) \hat{K}_1], \\ \alpha_0 = 1 - A + B - C = 4 + 4\alpha - \gamma T \cdot [2(1 - \beta) \hat{K}_p + (1 - \beta) \hat{K}_1] \end{cases}.$$

(11)

式(10)为三阶系统, 据Routh稳定判据, 稳定的充分必要条件是特征方程的所有系数均为正, 且 $\alpha_1 \alpha_2 > \alpha_0 \alpha_3$ [2], 即

$$\begin{cases} \alpha_i > 0, & i = 0, 1, 2, 3 \\ \alpha_1 \alpha_2 > \alpha_0 \alpha_3 \end{cases}.$$

(12)

其中变量 \hat{K}_p , \hat{K}_I 均是 T/T_m 的系数. 令 $\tau = T/T_m$, 则式中只有 \hat{K}_p , \hat{K}_I 3个变量, 在此情况下稳定域不易确定. 利用计算机绘出一组曲线(如图4), 对一个选定的 τ , 计算机可根据式(12)绘出5条曲线(其中 $i=0, 1, 2, 3$, 对应曲线 ①, ②, ③, ④, 而 $\tau_1 \tau_2 > \tau_0 \tau_3$ 对应曲线 ⑤), 每条曲线分别表示不等式的 \hat{K}_p , \hat{K}_I 的极限范围, 其公共部分为系统稳定运行的 \hat{K}_p , \hat{K}_I 取值范围.

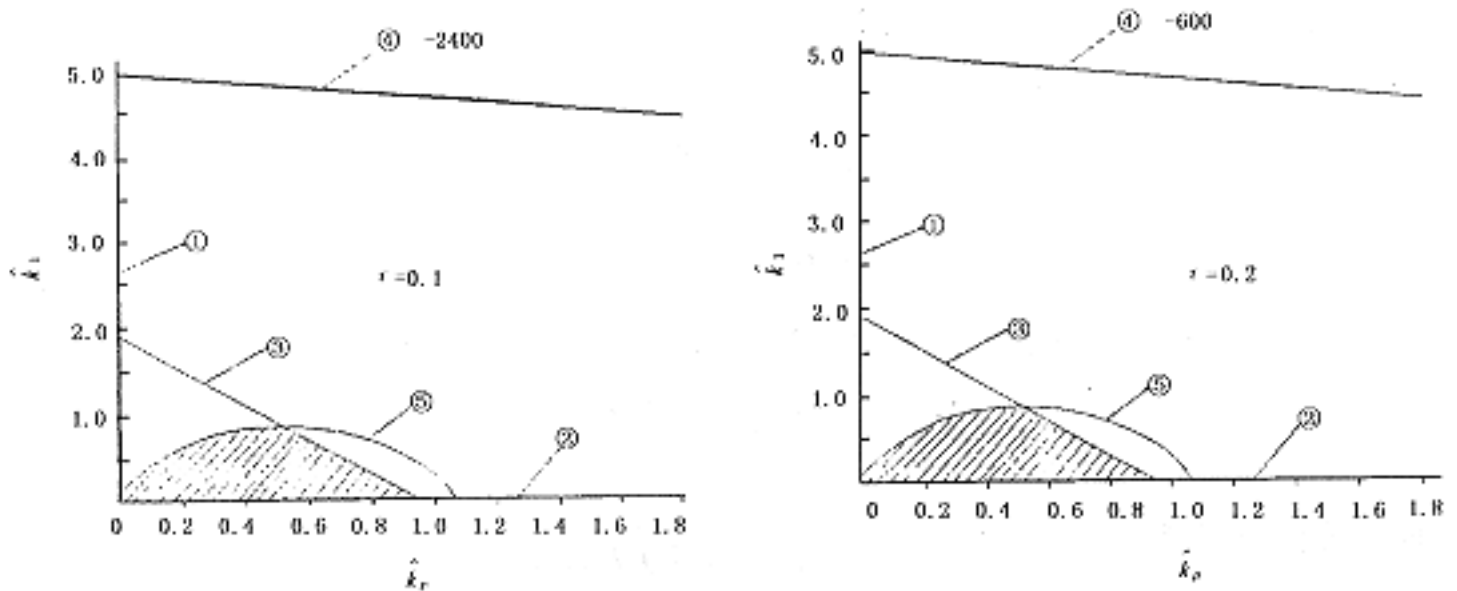


图4 控制系统的稳定域

4 结 论

根据结构允许的速度范围和系统稳定性要求的控制参数的确定范围, 笔者编制了控制软件, 经反复调试, 使该取样架投入使用. 从运行一年多的结果可以看出, 该取样架安全可靠, 控制定位精度可达0.02 mm. 但运行中发现, 影响稳定性的因素比较多, 如电源的不稳定, 设备维护不善等, 还需要采取一些措施增加系统的稳定性.

作者单位: 尚军平 毛乃宏 (西安电子科技大学天线与电磁散射研究所 西安 710071)

李 勇(中国科学院青海盐湖研究所 西宁 810081)

参 考 文 献

- [1] 璩柏青, 毛乃宏, 尚军平. 雷达天线近场测试系统中取样架的结构设计与有限元分析. 西安电子科技大学学报, 1995, 22(3): 262 ~ 268
- [2] 卢伯英. 线性控制系统. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1993

[3] 李 勇.雷达天线近场测量系统控制方法及工程实现：[硕士学位论文].西安：西安电子科技大学，1997

(编辑： 郭 华)

*收稿日期:1997-12-29

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深, 让许多工程师望而却步, 然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上, 我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识, 借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养, 推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程, 化繁为简, 直观易学, 可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛, 让天线设计不再难...



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书, 课程从基础讲起, 内容由浅入深, 理论介绍和实际操作讲解相结合, 全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程, 可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计, 让天线设计不再难...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程, 由经验丰富的专家授课, 旨在帮助您从零开始, 全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程, 边操作边讲解, 直观易学; 购买套装同时赠送 3 个月在线答疑, 帮您解答学习中遇到的问题, 让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程, 培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合, 全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作, 同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习, 可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试...

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养,更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果,又能免除您舟车劳顿的辛苦,学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲,结合实际工程案例,直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>