

电子装备试验系统的灰色特性研究

陈永光 柯宏发

(国防科技大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

(六三八八零部队 洛阳 471003)

摘要: 电子装备试验中存在很多信息不完全、不确定及数据少等不确定性决策问题,灰色系统理论是解决这种“贫信息”问题的有力工具。该文首先总结了电子装备试验系统的组成、传统意义下的试验系统特性;进而从系统的角度,提出了试验系统具有结构灰性、关系灰性、模型灰性、认知灰性等灰色特征;最后研究了试验数据的不确定性来源及其灰色表现形式,并给出了试验数据的不确定性度量和系统不确定性的平均度量数学模型。研究结论可为扩展利用灰色系统理论分析解决电子装备试验系统中的各种不确定性问题提供理论支撑。

关键词: 电子装备; 灰色系统; 不确定性; 试验系统

中图分类号: TN97

文献标识码: A

文章编辑: 1009-5896(2007)03-0560-05

Study on Grey Characteristic of Electronic Equipment Test System

Chen Yong-guang Ke Hong-fa

(College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

(Unit 63880, Luoyang 471003, China)

Abstract: There are many uncertain decision-making questions, in which the information is incomplete and vague, in the electronic equipment test system. The grey system theory is a powerful tool to settle the kind question. The component of the electronic equipment test system and its characteristic in the traditional sense are summarized firstly. Then from the view of system, the grey characteristics, including structure grey, relation grey, model grey and cognition grey, of the electronic equipment test system are proposed. Finally, the source and the grey model of uncertain information in electronic equipment tests are studied. The uncertainty measurement model of the test datum and the average uncertainty measurement model of the system are introduced. The research conclusions can offer theoretic supports for the increasing application of the grey system theory to the domain of the electronic equipment test system.

Key words: Electronic equipment; Grey system; Uncertainty; Test system

1 引言

电子装备是未来信息化战争的基石,电子装备的试验是装备研制过程中的一个重要环节^[1]。通过试验,不仅可以分析评估装备在特定电磁环境条件下完成作战使命的能力,而且可以在试验中发现问题和解决问题,并对装备存在的缺陷隐患提出改进和完善意见,从而使装备的技术水平得到提高和发展。

由于电子装备在未来信息化战场上始终处于错综复杂及大量的信号环境中^[1,2],因此影响其效能的因素或指标很多,而人们对它们的认知大多是不精确的和不完全的。另外由于试验条件及试验费用等条件的限制,突出了信息不完全、不确定问题。面对信息不完备、不确定和数据少的现实,如何正确描述、认识与处理电子信息装备试验中的情况和问题,就成为迫切需要解决的课题之一。灰色系统理论是研究“贫信息”系统的有力工具^[3,4],已经在电子装备试验系统部分问题的解决中取得了较好的应用效果^[5-9]。

本文总结了电子装备试验系统的组成,进一步分析了试

验系统的灰色特征,研究了其灰色表现形式,可为扩展利用灰色系统理论分析解决电子装备试验系统中的各种问题提供一定的理论支撑。

2 电子装备试验系统

电子装备试验系统是一个复杂的大系统,它由试验者、试验对象、试验手段和试验配试系统组成,其基本结构如图1所示。

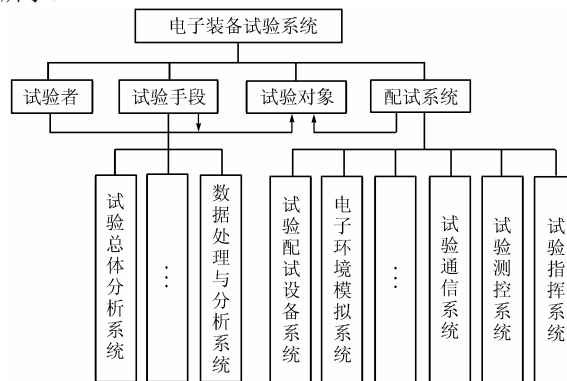


图1 电子装备试验系统的基本组成示意图

试验者是从事装备试验与鉴定的组织和个人,是试验的主体。试验对象是电子装备,主要是电子装备系统或其分系统、部件等,它们是试验的客体。试验手段是试验者作用于试验对象的媒介,试验者借助于试验手段,对试验对象进行试验与鉴定,主要包括试验总体分析系统、试验数据处理与分析系统等。试验配试系统主要包括试验配试装备设备系统、电子环境模拟系统、试验指挥系统、试验通信系统、试验测控系统等分系统。

电子装备试验系统的各个分系统、子系统及其要素之间相互联系、相互制约、相互作用,构成一个多层次、具有完成装备试验与鉴定任务的有机整体。

3 传统意义下的试验系统特性

电子装备试验的最终目的是对装备的效能进行评估,大致要经过以下几个过程:装备性能的考核试验或仿真、数据采集、数据处理或融合、效能评估等,如图2所示。

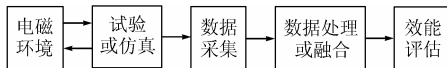


图2 试验与效能评估的信息流程

目前对于电子装备的试验与作战效能评估,不可能通过实际作战环境来获取数据,而是通过外场试验及仿真模拟试验进行。

传统意义下通常把整个试验过程看作一个信息完全确定或随机性的综合体进行考察,根据试验目标,依据系统科学方法(系统分析法、系统模型法和系统决策法等)、军事运筹方法、数学方法(把问题进行概念化和公式化,从而建立数学模型)和思维科学方法(分析与综合、归纳与演绎、类比等),研究各部分之间的相互作用关系,建立系统结构模型,在综合的引导下对各部分进行分析,最后进行综合决策。所有这些都是通过试验的原始数据信息来揭示试验系统和电子装备的一般规律,这些原始数据信息是建立在试验者对电子装备试验系统的完全认知或认为电子装备试验系统具有随机性基础上的。

例如,对于通信信号接收机^[10],当通信信号和干扰信号都是自由空间传播时,其接收到的信号功率干信比 ρ_i 为

$$\rho_i = \frac{P_{si}}{P_{ji}} = \frac{P_t \cdot G_t \cdot q_{rt} \cdot R_j^2}{P_j \cdot G_j \cdot q_{rj}(\theta) \cdot \gamma_j \cdot R_t^2 \cdot B_{rj}} \quad (1)$$

式中 P_{si} 、 P_{ji} 、 P_t 、 G_t 、 P_j 、 G_j 、 R_t 、 R_j 、 γ_j 、 q_{rt} 、 $q_{rj}(\theta)$ 和 B_{rj} 的物理含义见文献[10]。

在传统意义下,上式各量的求法都是通过各种模型和算法求出一个近似值,并将此近似值当作一个确定的真值;而实际上,如 $q_{rj}(\theta)$ 、 B_{rj} 、 G_t 等量,不可能就是一个准确的真值,而是一个区间量。

4 试验系统的灰色特征表现

外场试验及仿真模拟试验相对于实际作战环境中获取的数据而言存在着信息不完全或部分信息模糊等很多不确

定问题,另外,电子装备及其试验系统所固有的复杂性和不确定性,导致对电子装备及其试验现象的认识、模拟、预测和决策的非唯一性,这些性质都体现了电子装备试验系统具有灰色禀性。从一定意义上说,大多数电子装备试验系统具有灰色系统的特性;换言之,电子装备灰色试验系统具有广泛性。

4.1 结构灰性

信息少,数据不完整,对电子信息装备及其试验系统的结构不可能有全方位的认知,从而导致结构的灰性。

灰色系统大体上可划分为两类:一类是非本征性灰色系统,另一类是本征性灰色系统。大多数电子装备子系统是一个典型的非本征性灰色系统,即有物理原型但只能部分可观测,其特点是:系统内部结构复杂,影响因素众多,且部分可观测(包括具有部分验前知识)。而电子装备试验评估子系统则是典型的本征性灰色系统,无物理原型,试验者对决策信息只能部分掌握。因此,在对电子装备试验系统的分析、模拟、决策或控制过程中,常常遇到不确定干扰或系统“软量”问题,以及分析结论的非唯一问题等。

对电子装备试验系统,传统意义下多强调系统输入、输出信息的测取,如熟知的“黑箱子”系统辨识方法等。灰色系统理论认为,除此之外,还应充分利用系统内部结构的信息。例如,对系统的结构尤其是“灰色”参数的识别,仅靠传统的外部观测信息确定系统,往往会出现“不可识别”,“非适应”等问题,因此,需要补充信息或附加约束。其方法可以通过系统内部结构的方程运算或参数间的运算,间接获取它们变动的范围、边界等信息,逐步达到灰结构、灰数淡化和白化目的。

4.2 关系灰性

信息少,数据不多,难以对电子装备试验系统中电子装备之间、电子装备与外部环境之间等建立确定的函数关系,从而导致关系的灰性。

对电子装备试验过程而言,如果电子装备之间、电子装备与外部环境之间的作用、关系转换等是完全有规律的,则说它是有序的,是白的(明确的);如果是杂乱无章、无规律的,则说它是无序的,是黑的(不明确的);如果有一定特征,但不成为确定性,则说它是半序的,是灰的。这些作用、关系转换过程等不可控、内部机制或影响因素仅部分可测,使得电子装备试验过程和关系非确定与非唯一。

对电子装备试验过程中这些抽象的关系系统,灰色系统理论多偏重于对已有数据等信息的序化、整理与加工,从似乎很杂乱无序的原始数据列中找出有其规律的内容。它把受众多因素作用(或干扰)的一个或多个结果(如序列)称为灰色数列,原始数列变化可能是杂乱非平稳的,但是将它们作灰累加变换,则会显示一定的规律,同时也为建立系统连续模型提供了灰过程的中间信息。

4.3 模型灰性

信息少,数据不多,难以建立完备的函数空间,从而导致模型在性质、功效方面的不确定性以及模型存在许多“软量”(未知结构和参数)难以确切定义,即模型灰性。从不确定性系统分析的观点看,模型输出的不确定性主要是由两类问题或者它们的组合形成的。一种是系统本身的不确定性,它又可以归结为系统具有灰结构和灰参数;另外一种就是系统输入为灰变量时的不确定性。

如式(1)所描述的系统,当假设系统的结构参数 G_t 和输入变量 P_t 为灰量时,系统输出也是一个灰量。采用中点值和灰半径的表达形式,结构参数和输入变量分别表示为 $\langle G_t, \delta G_t \rangle$ 和 $\langle P_t, \delta P_t \rangle$, 输出则表示为 $\langle \rho_i, \delta \rho_i \rangle$, 这时式(1)变为

$$\langle \rho_i, \delta \rho_i \rangle = \frac{\langle P_t, \delta P_t \rangle \cdot \langle G_t, \delta G_t \rangle \cdot q_{rt} \cdot R_j^2}{P_j \cdot G_j \cdot q_{rj}(\theta) \cdot \gamma_j \cdot R_t^2 \cdot B_{rj}} \quad (2)$$

由灰数运算关系可以得到

$$\rho_i = \frac{P_t \cdot G_t \cdot q_{rt} \cdot R_j^2}{P_j \cdot G_j \cdot q_{rj}(\theta) \cdot \gamma_j \cdot R_t^2 \cdot B_{rj}} \quad (3)$$

$$\delta \rho_i = \frac{\delta P_t \cdot G_t \cdot q_{rt} \cdot R_j^2}{P_j \cdot G_j \cdot q_{rj}(\theta) \cdot \gamma_j \cdot R_t^2 \cdot B_{rj}} + \frac{P_t \cdot \delta G_t \cdot q_{rt} \cdot R_j^2}{P_j \cdot G_j \cdot q_{rj}(\theta) \cdot \gamma_j \cdot R_t^2 \cdot B_{rj}} + \frac{\delta P_t \cdot \delta G_t \cdot q_{rt} \cdot R_j^2}{P_j \cdot G_j \cdot q_{rj}(\theta) \cdot \gamma_j \cdot R_t^2 \cdot B_{rj}} \quad (4)$$

由上式可以看出:

(1)当系统模型和输入都是灰色(即具有不确定性)时,输出也是不确定性的,其不确定性由系统的不确定性(例子中由灰半径 δG_t 表达)和输入的不确定性(例子中由灰半径 δP_t 表达)两个部分组成。

(2)如果系统及输入都是确定的,则式(4)恒为零,这就把系统在传统意义下进行分析处理。

(3)如果系统是确定的,即 $\delta G_t = 0$, 但输入具有不确定性,则式(4)表示为

$$\delta \rho_i = \frac{\delta P_t \cdot G_t \cdot q_{rt} \cdot R_j^2}{P_j \cdot G_j \cdot q_{rj}(\theta) \cdot \gamma_j \cdot R_t^2 \cdot B_{rj}} \quad (5)$$

(4)如果输入是确定的,即 $\delta P_t = 0$, 但系统具有不确定性,则式(4)表示为

$$\delta \rho_i = \frac{P_t \cdot \delta G_t \cdot q_{rt} \cdot R_j^2}{P_j \cdot G_j \cdot q_{rj}(\theta) \cdot \gamma_j \cdot R_t^2 \cdot B_{rj}} \quad (6)$$

可见灰色系统模型与确定性系统模型既有区别又有联系,式(3)仅是 $\delta G_t = 0$ 和 $\delta P_t = 0$ 的特例。

由上面分析可以看出,电子装备试验系统的输入输出关系,往往并非完全确定或唯一,而是呈一种“准确定”规律变化,表现出一种灰域或灰带的关系^[3],如图3所示。

造成系统关系非唯一和不确定性的原因很多,可能是对试验系统及其实体的观测不足或试验系统及其实体之间的关系只能被部分观测,也可能是由于系统本身的复杂性导致

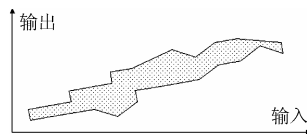


图3 一种输入输出灰关系示意图

对客观认识的非唯一性。

4.4 认知灰性

信息少,数据不多,只能对电子装备试验系统获得局部的认知,不确定的认知,默认性的认知,即认知灰性。

广义的认知灰性表现为对系统观测的不确定性和对系统认识的不确定性。前者来源于观测手段及误差干扰,如测不准原理等;后者主要源于过程现象复杂性和仅部分被观测造成对系统机理了解的信息不完全。例如,对客观规律认识的非唯一,对一个复杂客体做了一定程度简化等。实际上,这两种不确定性往往交织在一起,本文把系统变量所受随机干扰、信息不完全不确定性影响的总和,视为认知灰性。

综上所述,有关电子装备及其试验系统的数据信息,其信息不完全且受各种因素干扰、各种条件的限制,其数量和代表性等都具有不确定性特点。这些电子装备及其试验系统本身所呈现的特征以及仿真中面临的信息不完善性,表现出各种电子装备试验系统的灰色特性,它们的客观存在为电子装备灰色试验理论与方法的研究提供了客观基础。

5 试验数据灰色不确定性的表述

电子装备试验的一切决策活动都是基于试验数据进行的,因此研究试验数据的灰色不确定性来源及其表述方法具有极其重要的价值。

根据图2中所示的信息流程,对某个试验数据而言,可以认为其不确定性来源有以下几个方面:

(1)系统误差的不确定性 u_1

试验数据来源于试验者对试验目标的观测,其均值记为 x_{avg} , 均值与真值(记为 x_{tru})之差称为系统误差的不确定性,记为 u_1 ,

$$u_1 = x_{avg} - x_{tru} \quad (7)$$

从统计学的观点不难理解:当数据样本足够大时,如果 $u_1 \neq 0$, 则说明观测体系是有偏差的,即存在系统偏差的不确定性。在实际试验中,试验者希望消除系统误差的不确定性。但是实际上,试验者又往往不知道试验目标的真值 x_{tru} 到底是多少,需要借助于物理背景判断或假设检验方法来获得 x_{tru} 。

系统误差的来源有以下几个方面:

(a) 装备及试验系统自身存在的不稳定性

电子装备试验过程中由于装备软硬件故障、配置和工作方式的不合理等产生的不确定性;由一定限制条件下设计的试验系统自身存在的缺陷引起的不确定性;效能评估决定因素的不完整性等。

(b) 各种假设因素引起的不确定性

电子装备的试验或仿真是在各种假设条件下进行的，但是实际上电磁环境的瞬息变化、电波传播的不稳定性等都产生不确定性；数据服从一定的典型分布及各种算法的初始假设条件等都产生不确定性。

(2) 试验观测非精确的不确定性 u_2

即使是同一个试验者，每次试验过程中，由于受环境以及心理因素等的影响，其试验结果也是不尽相同的；同时，即使是同一台试验仪器(或者算法模型)，试验结果也会有一定的差异。试验数据相对于其均值 x_{avg} 的离散度称为试验观测非精确的不确定性，记为 u_2 。试验观测的离散度越大，获取数据的不确定性也越大。图 4 是两个试验者获取的试验数据示意图，其中试验者 1 的 $u_2(1)$ 大于试验者 2 的 $u_2(2)$ ，即 $u_2(1) > u_2(2)$ ，这说明试验者 1 所使用的观测仪器的精度低于试验者 2 所使用的观测仪器的精度。因此，精密度可以反映观测的准确性。

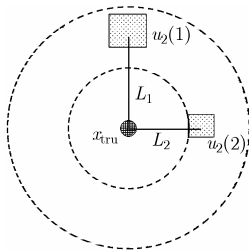


图 4 试验观测不确定性源的分析示意图

如图 4 所示，可以把每个离散度区的中心点与真值的距离(记为 L_i)定义为试验过程中试验数据量测的准确性。它是与系统误差 u_1 相联系的。精密的量测可以减少观测的系统误差，使 u_2 中心更接近于真值(图中的靶心)。由此可见，减少系统误差和提高观测的精确性十分重要。然而，根据“测不准原理”，准确性不可能比精密性更高，故观测非精确的不确定性总是存在的，至少随机误差源如此。

电子装备试验中的试验观测非精确的不确定性主要指测量仪器误差、数据采集误差和数据处理误差引起的不确定性以及效能评估模型和算法引起的不确定性，模型和算法的局限性会造成评估结果与实际效能不完全一致。

(3) 不同试验者实施试验观测的不确定性 u_3

以图 4 为例，一个试验者实施试验观测的离散度为 $u_2(1)$ ，其中心距图中的靶心距离为 L_1 ；另一个试验者实施试验观测的离散度为 $u_2(2)$ ，其中心距图中的靶心距离为 L_2 。定义

$$u_3 = L_1 - L_2 \tag{8}$$

为反映不同试验者实施试验观测过程中所表现出的验前知识或技能充分与否的不确定性。

在电子装备的试验中，由于认识客观先验知识不足，以及掌握观测的经验水平不同，由试验人员的观测误差产生的 u_3 不确定性从某种程度上讲还是比较显著的。

(4) 试验数据分辨率导致的不确定性 u_4

电子装备的试验中，系统整体不确定性有一部分来自于

数据分辨率导致的不确定性，由于分辨率所导致的不确定性是十分明显的。分辨率越大，对数据大小的区别能力越大。

实际试验过程中由于计算机引起的误差(截尾或舍入、离散形式存储和采样)和元素及数据表达所引起的不确定性均归入此类。

(5) 其它各种不确定性 u_5

主要指其它各种因素误差所引起的不确定性以及电子装备试验与效能评估过程中存在的不确定性积累。

(6) 其它未知不确定性 u_6

以上 5 类不确定性是在电子装备试验过程中逐步认识到的。除此之外，还有一些正在认识或尚未被认识的不确定性，这些未知的不确定性统记为 u_6 。

实际上， $u_1 \sim u_6$ 的这些不确定性可能相互影响。综上所述，试验系统的不确定性可以用一个数值区间来表达，

$$u = u_1 + u_2 + u_3 + u_4 + u_5 + u_6 = (x_{avg} - x_{tru}) + u_2 + u_3 + u_4 + u_5 + u_6 \tag{9}$$

式中，前两项不确定性可以通过统计分析加以识别，但是从 u_3 到 u_6 ，统计分析受到了限制。

从灰色系统理论的观点来看， u_1 到 u_6 可视为灰区间数，即

$$u(\otimes) = u_1(\otimes) + u_2(\otimes) + u_3(\otimes) + u_4(\otimes) + u_5(\otimes) + u_6(\otimes) \tag{10}$$

它们可以通过中点的白化值 u_{0i} 和灰半径 δu_i 给予描述，即 $u(\otimes) = \langle u_0, \delta u \rangle$ 。这时式(10)变为

$$\langle u_0, \delta u \rangle = \langle u_1, \delta u_1 \rangle + \langle u_2, \delta u_2 \rangle + \langle u_3, \delta u_3 \rangle + \langle u_4, \delta u_4 \rangle + \langle u_5, \delta u_5 \rangle + \langle u_6, \delta u_6 \rangle \tag{11}$$

式中单个灰参数的不确定性可以度量为

$$\Delta u_i = \frac{2 \cdot \delta u_i}{u_i} \times 100\%, \quad i = 1, 2, \dots, 6 \tag{12}$$

$$u_0 = u_1 + u_2 + u_3 + u_4 + u_5 + u_6 \tag{13}$$

试验数据的不确定性度量为

$$\Delta u_0 = \sum_{i=1}^6 \Delta u_i \tag{14}$$

则由

$$\Delta u_0 = \frac{2 \cdot \delta u_0}{u_0} \times 100\% \tag{15}$$

可以得到

$$\delta u_0 = (\Delta u_0 \cdot u_0) / 2 \tag{16}$$

于是可以得到试验数据关于灰色估计值和灰半径的灰色表达为 $\langle \hat{x}, \delta u_0 \rangle$ ，其中 \hat{x} 的求取方法见文献[7]。假设试验系统的试验数据有 n 个并且相互独立，则可以得到系统不确定性的平均度量为

$$\Delta u = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta u_{0i} \tag{17}$$

6 结束语

解决信息不完全、不确定及数据少等不确定性决策问题是电子装备试验中的重要研究课题之一。本文首先总结了电

子装备试验系统的组成和传统意义下的试验系统特性; 针对存在的不足, 进一步分析了试验系统的结构灰性、关系灰性、模型灰性、认知灰性等灰色特征; 针对试验中数据的不确定性来源研究了其灰色表现形式, 并给出了试验数据的不确定性度量和系统不确定性的平均度量数学模型。本文研究结论有较好的工程应用价值, 且具有一定的理论意义, 可为扩展利用灰色系统理论分析解决电子装备试验系统中的各种问题提供理论支撑。

参 考 文 献

- [1] Banks H and McQuillan R. Electronic warfare test and evaluation. NATO Research and Technology Organization, Neuilly-sur-Seine (France), March 2000(ADA377365).
- [2] Joint Chiefs of Staff. Joint Doctrine for Electronic Warfare, April 2000(ADA393359).
- [3] 邓聚龙. 灰理论基础. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002: 2-7.
- [4] 夏军. 灰色系统水文学—理论、方法及应用. 武汉: 华中理工大学出版社, 2000: 24-31, 161-167
- [5] Ke Hongfa, Chen Yongguang, and Wang Guoyu. Target assignment model of electronic equipments based on GM(1,1) model. *The Journal of Grey System*, 2005, 17(3): 235-242.
- [6] Ke Hongfa, Chen Yongguang, and Wang Guoyu. Grey relational evaluation for combat effectiveness of electronic equipment based on ideal reference sequence. The 5th IEEE International Conference on Cognitive Informatics, Beijing, July 17-19, 2006: 918-922.
- [7] 柯宏发, 陈永光, 楚振锋. 电子装备试验数据的灰色处理. 系统工程与电子技术, 2005, 27(8): 1409-1411.
Ke Hong-fa, Chen Yong-guang, and Chu Zhen-feng. Grey processing of electronic equipment test data. *Systems Engineering and Electronics*, 2005, 27(8): 1409-1411.
- [8] Ke Hong-fa, Chen Yong-guang, and Xia Bin. efficiency evaluation and comparison of electronic equipments via grey clustering. *The Journal of Grey System*, 2006, 18(3): 275-280.
- [9] 柯宏发, 陈永光, 刘波. 电子装备试验方案的灰色优选模型及算法. 电子学报, 2005, 33(6): 995-998.
Ke Hong-fa, Chen Yong-guang, and Liu Bo. Grey model and algorithm for the selection of electronic equipment test project. *Acta Electronica Sinica*, 2005, 33(6): 995-998.
- [10] 邵国培, 曹志耀, 何俊等. 电子对抗作战效能分析. 北京: 解放军出版社, 1998: 274-276.

陈永光: 男, 1962年生, 总工程师, 研究员, 博士生导师, 研究方向为电子信息装备试验技术.

柯宏发: 男, 1969年生, 博士生, 高级工程师, 研究方向为电子信息装备试验技术.