

doi: 10.7690/bgzd.2014.11.023

## 靶场试验安全管道设计与优化方法

孙艳英, 沈祉怡

(中国人民解放军 92941 部队, 辽宁 葫芦岛 125001)

**摘要:** 针对靶场试验安全管道设计中存在的问题, 提出靶场试验安全管道设计与优化方法。结合靶场实际工程背景及试验目的要求, 分析影响安全管道设计的主要因素, 建立一种满足靶场试验的安全管道和分析方法, 并从试验消耗、安控可靠性等角度完成对设计方案的量化分析、评估和优化。结果表明: 该方法能实现安全管道参数的自动化生成, 解决传统安全管道设计时存在的不能进行定量评价的问题, 使管道设计的优劣评价有更科学的评价依据, 可为靶场试验安全管道设计提供参考。

**关键词:** 靶场; 安全控制; 安全管道; 评估

**中图分类号:** TJ768 **文献标志码:** A

## Methods of Design and Optimization for Range Test Safety Channel

Sun Yanying, Shen Zhiyi

(No. 92941 Unit of PLA, Huludao 125001, China)

**Abstract:** Aiming to the problem of designing safety channel in range tests, the method of design and optimization for range test safety channel is put forward. Combining the actual engineering background with the purpose requests in ranges, the major factors influencing the design of safety channel is discussed. The safety channel and analytical method that can be satisfied with range test is built up. From the point of view of range test consumption and safety control reliability, the quantity analysis, valuation and excellent turn of the designed schemes is completed. The result show that the method can make the parameter of the safety channel produced automatically, resolve the traditional safety channel design method problem that other party case can not be evaluated qualitatively, make the evaluation of good and bad for the design of safety channel have the scientific basis, and provide the reference for the design of range test safety control.

**Keywords:** range; safety control; safety channel; evaluation

### 0 引言

对飞行中的导弹进行安全控制是靶场测控系统的主要使命之一。在试验过程中, 为确保试验航区内重点目标的安全, 必须对飞行中的故障弹进行安全控制。新型战术导弹的高空、高速和高机动等特性使试验危险性不断增大, 从而对靶场地面安全控制系统的安全性、可靠性要求大大提高。在保证航区周围重要目标安全的前提下, 最大限度地考核导弹的飞行性能、减小试验区域, 降低试验消耗, 是靶场武器系统试验的基本要求。

传统安全管道制作方法是根据导弹极限弹道并综合考虑装备测量误差和安控时延, 将安全管道必炸线左右边界按正负极限弹道外扩某一固定值进行设计, 并人工对弧形边界作切线进行截弯取直处理, 得到若干个组成的闭合区域。人工取点, 不但增加工作的复杂性, 精度相对较差, 且增大试验禁区并导致试验消耗增加。

如何根据试验具体要求, 依托靶场现有的测控能力, 结合海军靶场实际航区的特点和导弹飞行性

能, 设计出最优试验安全管道, 是一项复杂的工作。笔者根据武器系统试验的各自特点, 提出了具体的设计思路和方法, 建立了管道设计评估模型, 可为靶场正确评定武器系统的性能、指标提供客观依据。

### 1 安全管道设计

#### 1.1 设计原则和思路

依据试验的具体要求, 结合靶场试验航区特点和型号战术导弹的技术性能、飞行特点, 按照“实用、可靠、先进、经济”的指导方针进行设计。鉴于安全管道在任务中极其重要的作用, 在设计时要始终贯彻可靠性第一的思想, 确保试验的高可靠性。

研究弹道数据仿真、测控装备误差修正和空间坐标系旋转变换等技术, 根据导弹的理论弹道和导弹的极限弹道, 综合考虑测控设备的测量误差、导弹发射点和靶船就位点的误差、安控系统时延等, 按以最小试验区域、最大限度考核导弹飞行性能的原则, 确定最优试验安全管道。对设计好的安全管道, 在分析靶场测控装备跟踪覆盖范围、测量成功

收稿日期: 2014-05-26; 修回日期: 2014-06-20

作者简介: 孙艳英(1971—), 女, 辽宁人, 硕士, 高级工程师, 从事试验指挥与安全控制研究。

率和安控可靠性的基础上,对试验消耗进行分析评估,确定安全管道的合理性、最优性。

## 1.2 影响因素

### 1.2.1 安控时延

安控时延的环节可划分为设备处理时延、通信线路时延,中心信息采集处理时延、管道判决时延、人工判决时延、安控指令形成时延、安控指令到遥控设备的通信时延、遥控设备到弹上安控系统的时延和弹载指令执行时延。安控时延链路如图 1 所示。

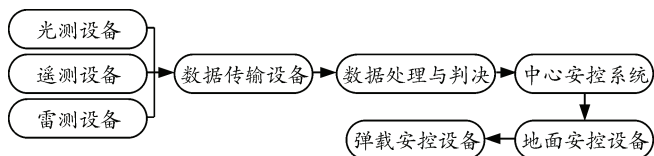


图 1 安控时延链路

安控时延估算一般按照各数据传输环节,估算数据流和指令传输路径的每一环节时延值,进行累加,取不同环节估算后的最大值。通过对各环节时间延迟的累加,得出测控设备测量导弹实际位置到导弹接收并执行安控指令之间的总延迟,其结果存在很大的主观性。

对某些环节的时延可采用偏度和峰度检验<sup>[1]</sup>法对传输时延进行统计,确定时延分布情况,并做假设检验加以确认,最后采用试验的方差分析方法检验时延是否有明显的差别,根据统计计算结果确定时延指标。

由于有些设备的时延较大,直接影响安控的实时性和可靠性,并加大试验安全管道区域。在管道设计时需要考虑不同设备的数据传输时延问题,对设备的数据传输时延进行实时修正<sup>[2]</sup>,以减小安控系统的时延,增强安全管道设计的准确性。

### 1.2.2 数据误差

靶场试验测量设备种类多样、测量数据误差<sup>[3-5]</sup>特性复杂,严重影响靶场数据处理精度。需要分析靶场测量设备在不同条件下的测量数据误差特性及分布情况,修正各测量误差,提高实时数据处理定位精度。如利用历史存储的测量设备实时测量数据,与事后真值求差得设备在不同跟踪范围、不同试验条件下的测量误差,再采用误差传播原理,根据原始测元中包含的多种误差特性及数据处理模型误差等,通过统计特性分析获得设备测量误差的估计量。

假设某测量设备第  $k$  次测量得到导弹的弹道坐标为  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , 弹道真值为  $x_{01}, x_{02}, \dots, x_{0n}$ 。则设备第  $k$  次测量精度估计值为:

$$\sigma_{xk}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - x_{0i})^2 \quad (1)$$

同理可得到

$$\sigma_{yk}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - y_{0i})^2 \quad (2)$$

$$\sigma_{zk}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (z_i - z_{0i})^2 \quad (3)$$

该设备测量误差估计统计结果为:

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n \sigma_{xk}^2 \quad (4)$$

$$\sigma_y^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n \sigma_{yk}^2 \quad (5)$$

$$\sigma_z^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n \sigma_{zk}^2 \quad (6)$$

除设备测量误差外,还需考虑发射点误差和就位点误差,求出综合试验误差,给出合理误差范围。

### 1.2.3 保护目标

若航线附近有重点保护目标,估算导弹被炸毁后残骸可能的散布范围<sup>[6-8]</sup>,评估对重点目标保护域威胁等级,根据重点保护目标与航线距离及评估结果,决定将目标保护域纳在安全管道之外或之内。

## 1.3 管道参数生成

靶场试验安全管道包括安全管道必炸线和安全管道告警线,必要时设置关键参数告警线和必炸线。安全管道必炸线(告警线)是由必炸线(告警线)左右边界、首端边界和底端边界组成的闭合区域。

安全管道必炸线左右边界是在综合考虑导弹发射误差、靶船就位点误差、设备测量误差、安控时延并考虑导弹飞行性能和一定安全系数的基础上,将导弹  $3\sigma$  正负极限弹道外扩,外扩大小由上述误差决定;管道首端边界是在考虑导弹发射点误差及设备测量误差基础上将理论发射点向前延伸,延伸距离由导弹发射点误差及设备测量误差累加决定,首端边界方向与射向垂直,并与安全管道必炸线左右边界向前延长线相交;管道底端边界是在考虑设备测量误差、惯导导航误差、导弹控制偏差和安控时延等因素的基础上将理论靶位点向后延伸,底端边界方向与导弹理论末端飞行方向垂直,并与安全管道必炸线左右边界向后延长线相交。安全管道告警线在考虑导弹飞行速度、安控时延和设备测量误差的基础上沿必炸线内缩得到(首端边界不变)。

测量设备种类不同,其数据传输时延和测量误差不同,导致安控时延和数据综合处理误差差异较

大，一般取最大安控时延和最大数据处理误差并留有一定余量的方法扩展安全管道，以保证管道设计的可靠性，这样又导致了试验消耗的增加。为保障试验可靠性又最大限度降低消耗，笔者根据安控主信息源不同，其测量成功率、参试质量评估结果、设备测量误差和数据传输处理时延等影响因素不同，分别采用最大安控时延和最大数据处理误差；不同测量段不同主信息源的最大传输处理时延及其最大数据处理误差；不同测量段不同主信息源的统计时延及其统计误差等不同设计准则设计出不同的安全管道，对设计出的安全管道进行指标评估和优化设计，选出最优方案作为最终管道设计方案。安全管道设计流程如图 2 所示。

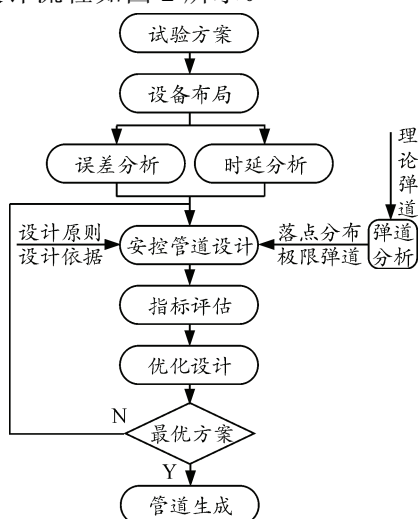


图 2 安全管道设计流程

## 2 指标评估

设计出的安全管道是否满足试验要求，需要对相关指标进行评估，包括对设备跟踪测量覆盖区域、设备测量成功率、安控可靠性和试验消耗等进行分析评价。

### 2.1 测元仿真

为了对相关指标进行定量分析，需要对目标在空间的位置、速度等参数进行测量，提供各测量设备到飞行目标的距离、测量设备相对于目标的方位角、高低角，及它们随时间的变化率等。

由工业部门提供的理论弹道是建立在发射坐标系下的定位分量 $(X, Y, Z)$ 及测速分量 $(v_x, v_y, v_z)$ ，需要输出的计算结果是测量设备到目标的距离、方位角和高低角。因此要进行发射坐标系与测量坐标系的转换，求得仿真测元<sup>[9]</sup>。同样，还需换算在设计的安全管道边界条件下测量设备对目标的仿真测元。

### 2.2 跟踪测量覆盖区域分析

通过计算各测量设备对理论弹道和管道边界的跟踪测量参数，根据设计方案设定的测量设备的战术技术指标(最大作用距离、测角范围、跟踪角速度和角加速度等)和布站，分析测控系统对被测目标可达到的跟踪测量范围<sup>[10]</sup>，分析一旦被测目标偏离至左右管道边界时，系统可实现的跟踪覆盖范围，比照测控系统总体设计目标，并留有一定余量，估算是否满足测控要求。

在靶场进行的试验，通常目标的飞行高度较低(5~20 m)，因地球曲率的影响，有些站位受地面的遮挡测量不到目标，因地形遮挡而影响测量范围的情况，需根据各测量设备周围的地形地貌，得到跟踪覆盖受限范围。通视距离计算近似公式为：

$$S = 3.85(H_1^{1/2} + H_2^{1/2}) \quad (7)$$

其中： $S$ 为可观测目标的最大距离； $H_1$ 为设备的站址高度； $H_2$ 是导弹距海面的高度。

### 2.3 设备测量成功率分析

测量成功率分析是对设计方案配置的各设备组成的测控系统进行可靠性估计，计算整个测控系统成功完成导弹飞行试验任务的概率。

笔者对设备或系统可靠性的评估分析方法，是以被评估设备或系统在近期内参加试验任务能够提供有效测量信息的能力作为衡量其可靠性的重要指标和依据，同时兼顾到测控设备近期的维护保养情况及参加试验合练校飞中的状态。在此基础上分析评估整个测控系统测量成功率，更符合靶场特点的测控设备及系统的可靠性分析方法。

设某设备在近 2 年内参加试验任务  $N$  次，有  $N_1$  次提供了有效的试验信息，未能提供有效信息的情况包括设备故障、操作手操作失误和测量信息异常等。计算设备单台测量成功率  $r$  的公式如下：

$$r = \frac{N_1}{N} \quad (8)$$

系统测量成功率估计模型是评估系统可靠性的关键。在建立系统测量成功率模型中，均假定在其他相关试验因素满足正常测量要求的前提下，来估计系统的试验成功率。

在测控系统的方案设计时，测控系统中的各设备是相互独立的，因而整个测控系统的成功率模型为并联结构，只有当所有设备都同时发生故障时，系统才发生故障。

系统的成功率计算公式为：

$$R_s = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - r_i) \tag{9}$$

在成功率满足试验测量要求的基础上，通常仍使全系统有一定的冗余空间，增加系统应付意外事故的能力。

### 2.4 安控可靠性

安控由弹上分系统和地面系统组成，两系统采用并联方式。将分系统装备按工作方式进行分类，建立各装备的可靠性模型和框图，按照设备基本可靠性指标 MTBF 值和规定的任务时间，通过可靠性计算关系  $R=e^{-\lambda t}$ ，预计各装备的任务可靠性。

### 2.5 试验消耗评估

通过对参试岗位、人员、设备数量和完成任务的时间等进行量化分析，制定出试验消耗的标准成本，从而对试验消耗进行控制和统计，逐步实现提高试验质量、缩短试验周期、确保试验安全、减少试验消耗和提高试验效益的目的。

针对某一具体设计方案，根据参试设备、投入的兵力等，在对各参试分系统量化的基础上，可以估计出具体设计方案的试验费用。

将整个试验系统分为若干个子系统，设为  $M$ ，各子系统中的参试单元的数量为  $N_M$ ，各单元的试验费用为  $S_{ij}$ ，则总的试验消耗  $S$  为

$$S = \sum_{i=1}^M S_i = \sum_{j=1}^{N_1} S_{1j} + \sum_{j=2}^{N_2} S_{2j} + \dots + \sum_{j=1}^{N_M} S_{Mj} \tag{10}$$

## 3 管道设计优化

### 3.1 方案综合评估

方案评估可利用系统评价方法，对设计出的各可行方案，从不同角度予以综合考察，全面权衡利弊得失，为方案选择提供科学依据。

在安全管道设计中，需选取最重要的几个指标作为方案的评价指标，选择系统跟踪测量覆盖范围、设备测量成功率、安控可靠性及试验消耗作为方案的评价指标，这些指标也是管道设计方案的约束条件，方案与约束条件的关系用目标函数表示。

针对某一具体的安全管道设计方案，根据前面论述的指标评估方法，分析各个方案的目标值。运用系统工程原理中提供的有关系统评估的理论和方法，选择合适的评估模型，根据导弹靶场试验的具体要求，选择合理的量化方法，得到方案的综合评估结果。方案综合评估方法采用系统工程中常用的主要目标法和功效系数法，对设计出的安全管道进

行综合评估分析<sup>[11]</sup>。

#### 3.1.1 主要目标法

在试验安全管道设计中，主要的目标函数是系统跟踪测量覆盖范围、设备测量成功率、安控可靠性和试验消耗。如果其中某项最为重要，设为  $f_i(x)$ ，希望它为最优值，就可以满足主要指标，而让其他指标在一定的约束范围内变化，并求所需指标的最优值，这样就将多目标问题转换为单目标来求解。

#### 3.1.2 功效系数法

评价方案的主要评价目标，如测量成功率、安控可靠性等要求越高越好，而试验消耗则越低越好，对于这些目标  $f_i(x)$  分别赋予一定的功效系数  $d_i$ ， $d_i$  在  $[0, 1]$  之间，当目标达到最满意时，取  $d_i=1$ ；最差时， $d_i=0$ 。对于不同类型的目标，应选用不同类型的功效函数<sup>[11]</sup>。

I 型： $f_i$  越大， $d_i$  越大； $f_i$  越小， $d_i$  越小。

II 型： $f_i$  越大， $d_i$  越小； $f_i$  越小， $d_i$  越大。

功效函数构造方法很多，有直线法、折线法和指数法等，笔者选用指数法来构造各评价目标的功效函数。

用指数法构造 I 型功效函数，可设其表达式为

$$d = \exp \left[ -e^{\left( \frac{f-f^1}{f^0-f^1} \right)} \right] \tag{11}$$

对 II 型功效函数，表达式为

$$d = 1 - \exp \left[ -e^{\left( \frac{f-f^1}{f^0-f^1} \right)} \right] \tag{12}$$

对预评估方案的每个目标都可用其对应的功效函数转换为相应的功效系数  $d_1, d_2, \dots, d_m$ ，用它们的几何平均值

$$D = \sqrt[m]{d_1 d_2 \dots d_m} \tag{13}$$

为评价函数， $D$  越大则方案的综合效能越好。

### 3.2 优化方法

按不同参试装备的不同传输及处理时延、测量误差，并基于不同目标保护策略，设计出多种可行的安全管道方案，对设计出的安全管道方案，采用主要目标法从不同角度予以综合考察，根据指标评估结果的不足之处(如不满足约束条件)，在满足试验需求的基础上对管道设计参数进行调整，并对调整后的设计方案重新进行评估，使该方案尽量达到最优化。