

兵器试验理论研究与实践

——闫章更学术讲座及论文选

中国华阴兵器试验中心 编

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

兵器试验理论与实践 / 中国华阴兵器试验中心编. —北京:
国防工业出版社, 2013. 5

ISBN 978 - 7 - 118 - 08874 - 8

I. ①兵… II. ①中… III. ①炮弹—外弹道试验—文集 ②汉字—
法书—作品集—中国—现代 IV. ①TJ012. 3 - 53 ②J292. 28

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 146457 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787 × 1092 1/16 印张 30½ 字数 701 千字

2013 年 5 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 168.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 68428422

发行邮购: (010) 68414474

发行传真: (010) 68411535

发行业务: (010) 68472764

序

看到中国华阴兵器试验中心即将编辑出版的闫章更同志的学术文集，我非常高兴！

章更同志是我国常规武器试验和技术体系的重要开拓者，从1963年起，他一直工作在常规武器科研试验第一线，从事试验理论与方法、射表编拟、试验统计、数据处理的实践与研究，为我国常规武器试验和技术体系的创建，推进武器装备现代化建设做出了重要贡献。我几次去华阴兵器试验中心调研，有幸和章更同志共同讨论过一些常规武器发展的重要技术问题，对他严谨的治学精神和精深的学术造诣留下了深刻印象。

章更同志的这本学术文集不仅展现了他的学术思想和科研成就，也体现了一代兵器试验人追求真知、甘于奉献、报效国家的人生追求和崇高风范。这本文集从一个侧面反映了具有我军特色的常规武器科研试验事业艰辛探索的历史轨迹，是弘扬武器装备科研试验战线优秀文化和优良传统，培养年轻一代科技英才的好教材。该文集的出版，对进一步推动我军武器试验技术科学发展具有重要的参考价值和积极的促进作用。

衷心祝愿我军武器装备战线涌现出更多的闫章更式的大家和栋梁之材！



2011年9月20日

“打得准”才能“打得赢”（代序二）

科学时报评论员

我们向读者推荐本报记者关于常规武器弹道专家闫章更事迹的通讯。

拿破仑的经典定义“炮兵是战争之神”概括出热兵器时代一切兵器的本质；或者可以换一种通俗的说法，即当今装备军队的所有兵器全是炮。坦克是陆地行动的炮，飞机是空中行动的炮，军舰是海上行动的炮，核武器无非是杀伤力更大的炮。西方军事家常常说核战争会导致人类毁灭，其实常规战争无限扩大与持续的结局不同样让人触目惊心么？任何国家要想独立自主，那就必须首先做到自己保卫自己，如果一个国家没有这个力量，你靠什么坚持正义？你凭什么维护尊严？

既然要保卫本国安全，那就要完善火炮装备，为实现这种完善，世界各国可谓八仙过海。不论你是否加大火炮射程、不论你是否加大炮弹重量，其前提则是打得准。唯有打得准方能打得狠方能打得赢。闫章更是中国特色常规兵器试验理论和技术体系的重要开拓者，他的科技成果为我们的战争之神擦亮眼睛，带来巨大的军事效益安全效益和经济效益。而闫章更之所以能够如此，记者的通讯揭示了其中的深刻原因。

我们常说要提高全民族素质。那么什么是素质呢？闫章更的人生追求给我们最直观最鲜明的回答。素质不是简单地为风所动为情所驱地唱歌跳舞，素质不是片面追赶时髦双语教学多办奥校。闫章更之所以成果迭出，赢得同行的敬仰与同事的敬佩，关键在于他拥有素质的制空权——热爱祖国心系人

民志在强国。闫章更和闫章更代表的一大批军队和地方科教工作者，是名副其实的中华民族伟大复兴的脊梁。什么叫耐得住寂寞，什么叫抗得住潮流，什么叫顶得住诱惑，什么叫识得了经纬？这不要大而化之，这不能敬而远之，这更不应堂而皇之，我们面对的不是没有规律的脚本，我们并不缺少寻根究源的底蕴，我们不做失掉重心的秤砣，我们绝不满足急功近利的浮躁与蜻蜓点水的满足。青年一代不仅仅青年一代应该从闫章更身上看到修身修德修养的方向，发现人生的高尚价值与现代坐标。

我们向科教战线的英才闫章更致敬，我们向培育闫章更这样科教英才的人民军队致敬！

载于《科学时报》2002年09月10日一版

一鸟致远 众鸟高飞

(代前言)

文章千古事，风雨十年人。闫章更同志工作在常规兵器科研试验技术领域第一线已是五个十年，是我中心试验理论、方法及试验技术的重要开拓者，为创建我国常规兵器试验理论和技术体系，推进武器装备现代化建设作出了重要贡献。

闫章更同志作为我中心科技干部的杰出代表，荣获中心诸多第一。改革开放后国家恢复技术职称时，他第一个并且是唯一一个由技术员晋升为当时国家工程系列的最高职称——工程师；第一个享受国务院一等（当时分一等和二等两种）政府特殊津贴；第一个被授予专业技术少将军衔；第一个被授予全国优秀科技工作者荣誉称号；第一个当选为全国人大代表；第一个获军队杰出专业技术人才奖；第一个出席全军英雄模范代表大会；第一个晋升为专业技术1级；第一个荣立个人一等功。

为者常成，行者常至。上世纪70年代初的靶场初建期，在编拟试验中心第一个射表时，出现了试验结果与从苏联引进的“射表检查三个评定标准”的严重矛盾现象。这惊动了华阴、白城两个试验中心，也惊动了兵器界相关人士及上级，认为此次试验混有不能容忍的“大的系统误差”。“研究工作允许失败，编拟射表决不允许失败”，找不出原因试验就是失败的，将承担“技术责任”和“政治责任”。争论持续了一年零六个月。争论中，闫章更同志的

课题组研究认为，试验结果并没有混进大的系统误差，试验是非常成功的，而“三个评定标准”在理论上则是错误的。他们一鼓作气撰写上报了三篇论文全面系统地论述了他们的观点，彻底否定了当时被迷信着的“三个评定标准”，并通过华阴和白城两试验中心共射击 500 多发弹的专门试验检验，验证了研究结论的正确性，使我国射表技术冲出了禁锢我们十多年的“三个评定标准”的洋框框束缚；70 年代中期，闫章更同志带领由试验中心技术人员和中国科学院研究员项可风、陶波、吴传仪、李国英等组成的研究小组，针对“兵器试验的观测数据无不带有随机性”这一显著特点，将数理统计理论引进到兵器试验技术领域，解决了引进的、当时正在使用的原苏联兵器试验技术资料中的“当日误差”、“单发命中率检验”等一系列概念模糊、理论不清的基础性统计学问题，在系统总结该项研究成果的基础上出版了兵器试验领域第一本统计学方面专著《兵器试验统计学》（内部）；70 年代后期，国内有关教授发表论文对靶场密集度分组试验提出了不同意见，并编入有关教材，认为“分组对密集度试验有弊”、“分组试验并不能提高所确定的指标精度，反而更多地消耗人力物力，也更多地消耗弹药”。由于论文作者的权威性，致使有关单位向上级打报告，严厉要求靶场认真学习“不分组”论文、“教材”，改正“分组试验法”，并要求靶场对已试验过的某些型号产品按“不分组”理论重新进行试验修正，也致使靶场密集度试验一度出现了各行其是的混乱局面。在这种背景下，闫章更同志“不唯上，不唯书”，对“分组”和“不分组”的争论从理论和实践上进行了全面系统的研究，得出了“不分组”理论不符合实际，“分组”理论才是正确的结论，研究成果在兵工学会公布后引起巨大反响，并惊动了中国科学院。这一研究为建立我国自己的常规兵器试验法作了重要理论探索，维护了靶场密集度“试验法”的严肃性，结束了密集

度试验各行其是的混乱局面；80年代初，主管国防工业的张爱萍将军就常规兵器试验用弹多、周期长、精度差的问题作出“采用先进技术，提高质量，节省弹药，缩短周期”的重要批示，闫章更同志悉心研究，第一个将引进的多卜勒雷达应用到射表试验技术中，在83年编拟部队的两个紧急射表任务中节省弹药50%以上，任务周期由原来100和130个工作日缩短至4和7个工作日，结束了沿用国外落后的“43年阻力定律”编拟射表长达30多年的历史，被认为是射表编拟史上一个划时代变化；90年代初，闫章更同志作为技术主谈随团赴北欧某国考察纸靶靶道，但该国却以中国所谓的人权问题撕毁了协议，不让访问团参观、不让和专家交谈，回国后，他愤书“志强”两个大字挂在墙上，以强烈为国争气的决心带领课题组进行研究，不到三年时间，创立了我们自己的实弹自由飞纸靶试验新技术及用改变弹丸重心位置测定马格努斯效应技术，一举解决了困扰常规兵器试验中心40多年的飞行弹丸空气动力参数提取、弹丸稳定性分析因子提取、起始扰动攻角的测定、气动跳角测定等四大难题以及获取马格努斯效应动导系数的重大难题；90年代中期，受海湾战争的启示，闫章更同志带领课题组研究建立了适合我国国情的射表火控弹道模型，与北约组织的4D射表火控模型相比，提高解算速度40%，为我国射表及火控系统现代化提供了理论支撑；90年代末期，他带领课题组建立了估计命中概率的小样本T——函数法，提高了估计精度；进入新世纪，他全面系统地总结了我国射表技术的历史经验和成就，公开出版了国内第一部《射表技术》专著，是我试验中心专业技术学术发展一重要硕果；2006年，针对高新技术武器靶场试验鉴定提出的一系列新问题，他带领课题组开展了现代试验鉴定理论与方法的研究，自主创立了现代军事抽样检验八种新方法，初步实现了小样本下对武器性能的科学评定，2008年在全军武器试验鉴定系

统进行了推广；2008 年公开出版了另一部学术专著《现代军事抽样检验方法及应用》，被认为是对统计学抽样检验理论的丰富和发展；2009 年，他带领课题组针对国内在火工品感度试验中应用国外“升降法”、“兰利法”存在的理论不清、失效率高等一系列问题，基于国际上著名的“EM 算法”的基本原理，建立了火工品感度试验数据处理的 S—EM 法，应用统计学中 Fisher 信息量理论建立了火工品感度试验两阶段优化设计法，使我国感度试验技术得到重要突破，处于先进水平。在他获得的 24 项成果中 21 项排名第 1；在试验中心获得的 4 项军队科技进步一等奖中，有 3 项由他负责完成；他的两部学术专著被有关大专院校选为研究生教材或重点参考书；其主持、审查编拟的 30 多种射表均已装备部队。

春随香草千年艳，精神到处文章老。闫章更同志有很多优秀的精神品质，非常令人钦佩，也使人深受感动和教育。在他身上始终有那么一股对党和人民的事业无限忠诚的炽热情怀，始终有那么一股为我军武器装备现代化事业开拓创新的昂扬锐气，始终有那么一股对名利地位淡然处之的高尚情操。他是我们党培养、教育下成长起来的新一代知识分子的楷模，也是军队广大科技工作者献身国防现代化事业学习的榜样。2002 年，中央电视台、人民日报、科技日报等全国各新闻媒体陆续报道了闫章更同志的先进事迹。我们编辑出版这部学术文集，旨在教育引导年轻科技工作者向闫章更同志学习，大力弘扬我国常规靶场试验技术领域一代代兵工人，呕心沥血、辛勤耕耘、忠诚使命、艰苦创业、科学求实、聚力创优、自我加压、锐意创新的优良传统，为进一步推动常规兵器试验理论与技术的进步和发展做贡献。

本文集收入闫章更同志在我中心 2009 年建场 40 周年庆祝活动中，就试验理论、方法及试验技术等方面的有关问题所做系列学术讲座 8 篇及 1975 年后

的部分论文或专题报告（按时间顺序编排）共41篇。期望以此能够反映出闫章更同志的学术思想和科研成就，成为培养兵器试验科技英才的一部好教材。

本文集初稿于9月初完成后，送交总装备部科技委主任兼总装备部副部长李安东上将、总装备部副政委黄作兴中将审阅指导，得到很大支持和帮助。李安东上将在百忙中还特亲自为文集写了“序”，对闫章更同志及文集的编辑出版给予了高度评价和认可，这不仅使闫章更同志也使中心广大科技干部受到极大鼓舞和鞭策，大家表示将以此激励自己，努力为国防事业做贡献。在此，特向李主任、黄副政委表示衷心感谢！

一鸟致远，众鸟高飞。愿更多更多的靶场群鹰展翅飞翔。

中国华阴兵器试验中心

2011年10月20日

目 录

1	军事抽样检验新方法	1
2	旋转弹俯仰偏航运动的线性化理论及应用	26
3	刚体弹道特性纸靶测量新技术及应用	47
4	述评北约组织的火控弹道模型	74
5	对国际流行感度试验升降法、兰利法的研究评估	86
6	感度试验数据处理的 S - EM 方法	97
7	Fisher 信息量与感度试验的优化设计	116
8	射表技术三部曲	127
9	关于反常结果剔除问题的研究	145
10	距离对比试验结果评定	156
11	密集度对比试验结果评定	162
12	射表检查结果评定	165
13	关于单发命中概率的估算方法的研究	173
14	关于射表精度控制问题的探讨	204
15	关于第二个反常结果剔除问题	210
16	武器弹药的密集度试验分组比不分组好	214
17	正态总体标准差检验的 OC 函数及应用	226
18	再谈密集度试验不同组内的方差齐性问题	232
19	关于显著性检验在兵器试验中的应用问题	240
20	兵器试验样本量的确定方法	246
21	武器弹药分组试验的方差齐性问题与常规兵器试验法	281
22	关于测量设备的精度指标问题	290
23	DR - 582 雷达测速精度的统计分析	299
24	估计测量精度的一种统计方法	305
25	弹道靶道概述	308
26	射表编拟技术的思考与展望	318
27	多普勒雷达测量数据的处理	326
28	偏航纸靶试验数据的处理	342
29	非线性气动参数的提取	379
30	样条函数在靶场数据处理中的应用	395
31	射表射击试验方案的计算机模拟及分析	405

32	低伸弹道弹丸飞行特性的纸靶测量	417
33	对称发射体角运动参数的图解法辨识	422
34	用改变弹丸质心位置的方法对升力、马格努斯力系数的辨识	427
35	射表误差估计	430
36	子母弹散布参数辨识	435
37	火箭弹修正的质点弹道模型	438
38	底排弹改进的质点弹道模型	441
39	底排弹减阻参数与气动参数辨识模型	448
40	非简单随机样本下导弹平均命中率的检验与估计	457
41	战术导弹系统效能的估计与评定	463
参考文献.....		471

军事抽样检验新方法

闫章更

2008 年我们出版了一本书，公布了我们关于“军事抽样检验方法”新的研究成果，引起了有关方面的重视和注意。在这次纪念活动中，有关技术人员要求对这些新方法进行一次辅导或导引性的学术讲座，以方便阅读。根据这个要求，这里，我主要介绍新方法建立的背景、基本思路和应用，而公式推导等数学上涉及的较复杂问题不再赘述。

1 引言

在军事技术领域，抽样检验的理论与方法占很重要的地位。主要表现在以下几方面。

- (1) 武器、弹药等批量生产的产品验收中要进行抽样检验。
- (2) 新型号武器弹药靶场试验中要用抽样检验方法进行设计定型和生产定型。
- (3) 武器弹药等军事装备的生产过程中，为判定一个生产“过程”是否可以被接受，也用抽样检验方法。
- (4) 在国际军事技术协作中，为保证交付产品的质量，协议书中也都规定交货时要进行抽样检验。
- (5) 其他军用产品的质量验收中，需要通过抽样检验进行质量把关等。

然而，在军事抽样检验中，我们遇到了一系列理论和实践上的难题，用传统的抽样检验方法常常难以或无法完成。对此，我们给出了一套新的抽样检验方法。

下面从四个方面就主要内容作一简要介绍。

- (1) 新方法产生的背景。
- (2) 新方法建立的思路。
- (3) 新方法简介。
- (4) 两个应用。

2 新方法产生的背景

各种战术导弹、炮弹、火箭弹、各种火工品等武器的质量验收或鉴定，一般都是采用实弹射击的方法，即对给定的武器系统在要求的条件下进行实弹射击试验，同时观测每一

次的射击结果,通过对观测结果的统计分析给出被试产品的质量是否满足指标要求的具体结论。这一过程我们称为“射击抽样检验”。

抽样检验中我们遇到了一系列新问题。

(1)“非简单随机样本”问题。经典的抽样检验方法建立的基础是样本的独立、同分布性质,即“简单随机样本”。武器射击抽样要在不同条件下进行,其样本虽相互独立,但具有不同的分布,是“非简单随机样本”。用“非简单随机样本”作统计分析,现阶段还没有相应的理论和方法供参考。

(2)“混合样本”问题。在高新技术武器的一组试验数据中,常常是计数数据和计量数据“混合”在一起的。按经典的抽样检验理论,是把计量数据转化为计数数据,这造成信息的浪费,从而增加了用弹量。这就提出如何用这种“混合样本”对武器系统性能进行分析评定问题。

(3)样本量的控制问题。在高新技术武器试验鉴定中,需要控制的是最大样本量,目前的一些相关研究结果,只是控制平均样本量,远不能满足实际需要。

(4)用弹量问题。高新技术武器需要通过射击抽样检验的战术技术指标很多,按传统检验方法需要的用弹量太多,而实际能提供给试验场用于试验鉴定的用弹量通常只有几发或十几发。如何用仅有的几发、十几发试验结果对武器系统做科学评定是试验鉴定技术领域面临的重大难题。

(5)关于国内外流行的抽样检验方法问题。现国内外使用的抽样检验方法主要有 M - S - 105D 抽样检验标准(美国、英国和加拿大共同制定)、IEC1123 序贯抽样检验标准(国际标准)等。这些标准已不能完全满足实际需要。

在这种背景下,我们研究出了八种新的抽样检验方法。

- (1)计数型序贯网图检验方法。
- (2)计数型截尾序贯网图检验方法。
- (3)计数型截尾二次序贯网图检验方法。
- (4)计量型序贯网图检验方法。
- (5)复杂总体下计量型检验方法。
- (6)复杂总体下计数型检验方法。
- (7)简单总体下的半计量型检验方法。
- (8)复杂总体下半计量型检验方法。

以上各方法,均配有相应的应用软件,并附有 100 组常用方案,可直接采用。

3 新方法建立的基本思路

我们的基本思路有以下三点。

3.1 以 Wald 的序贯概率比检验为背景,构建序贯网图理论

我们知道,第二次世界大战期间,Wald 提出了一种序贯概率比检验方法,在国际上引

起了巨大反响,图 3.1 就是 Wald 的序贯概率比检验图。图中两条平行的斜线是 Wald 的检验线。当试验点落在两个平行线内时,继续抽样;当试验点落在两个平行线上方时,试验停止,接收原假设;当试验点落在两个平行线下方时,也结束试验,拒绝原假设。

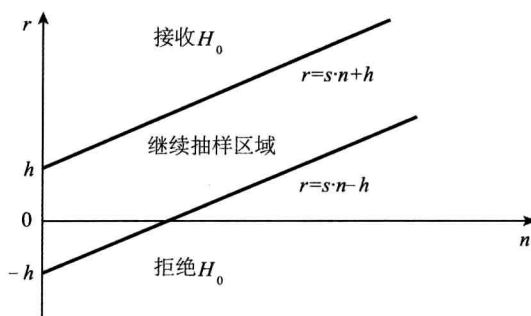


图 3.1 Wald 序贯概率比检验图

我们希望用这种方法,因为它平均可以节省样本量 30% ~ 50%。20 世纪 70 年代初,我们首次使用这一方法,使用中遇到了两个难题。一是不知道怎样做弹药预算,也不知道什么时候能结束试验,因为这种方法的继续试验区域是一个半开的区间,没有给出明确的用弹量上限。二是平均样本量的减少不等于每一次试验样本量都会减少,因此,我们曾冷落了这一方法。2005 年,根据某任务的需要,我们提出了改进这一方法的想法,希望不仅要有一个明确的样本量上限,而且这个上限要尽可能小,在这种考虑下,我们构建了一种序贯网图。其基本思路如下。

检验的假设为

$$H_0: q = q_0, \quad H_1: q = q_1 \quad (q_0 > q_1)$$

不失一般性,假定 q 是成功率,现在两个指标值中插入 m 个点: $q_2, q_3, \dots, q_{m+1}$, 将检验的假设拆分为如下 $m+1$ 对假设,即

$$\begin{aligned} H_{0,1}: q = q_0, & \quad H_{1,1}: q = q_2 \\ H_{0,2}: q = q_2, & \quad H_{1,2}: q = q_3 \\ & \quad \dots \\ H_{0,m}: q = q_m, & \quad H_{1,m}: q = q_{m+1} \\ H_{0,m+1}: q = q_{m+1}, & \quad H_{1,m+1}: q = q_1 \end{aligned}$$

式中: $q_2 > q_3 > \dots > q_{m+1}$ 是取值于两个指标值之间的 m 个待定参数。

对这 $m+1$ 组假设同时使用 Wald 的序贯概率比检验方法在同一张图纸上对每一对假设都画出 Wald 的平行线,其下一对平行线的下线与上一对平行线的上线相交,整个图形像一个“网格状”,称为“网图”。又由于图中的每一对直线都是 Wald 的序贯检验线,故称为“序贯网图”。通过对网图优化可对原来的检验问题做出判断。图 3.2 是 2000 年我们用手工作的一张网图。

图中纵坐标代表失败数，横坐标是试验数，插入点为等间隔。图中的(1)是第一对 Wald 的检验线，标号为(2)的是第二对 Wald 的检验线，依次有第三对、第四对、……，从图中我们可以看出，第二对 Wald 检验线的上线与第一对 Wald 检验线的下线相交，从而形成了一个封闭区域。依次，也有几个封闭区。通过试算和分析我们知道，这些封闭区域一定含有如何控制最大样本量的信息和其他有用信息。2001 年，我们将这一思路在学术界进行了交流，得到了著名统计学家陈希儒教授、张尧庭教授的热情支持，他们说：“这极有研究价值，是一个有价值的思考”。这就是“序贯网图”思路的形成和来源。图 3.3 是这次研究优化后的网图，图中纵坐标代表成功数 r 。

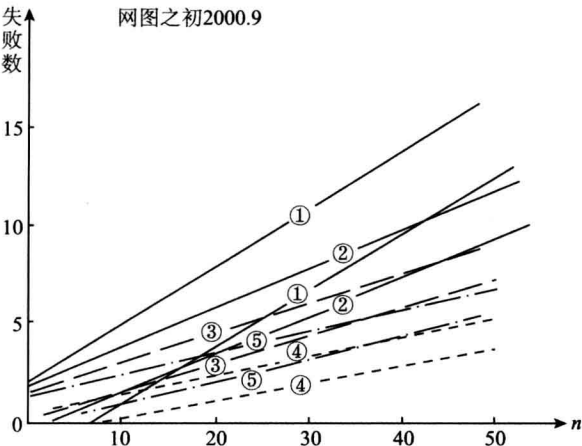


图 3.2 对某型号导弹应用手工制作的网图

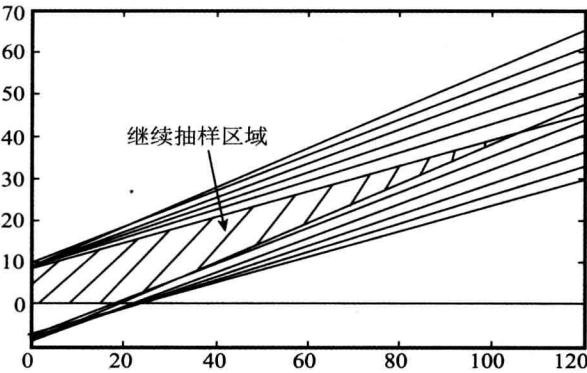


图 3.3 优化后的网图

- 关于序贯网图，理论上要研究的问题很多，主要有以下几方面。
- 应插入几个点？
 - 如何选择插入点的位置？
 - 怎样确定每一组序贯网图的参数？
 - 如何确定检验的实际风险？

序贯网图检验的优化问题等。

对这些理论问题，我们做了深入系统的研究，取得了一些重要结果，得出了非常有应用价值的结论。

(1) 插入多个点的序贯网图检验等同于插入两个点的序贯网图检验。

(2) 插入两个点和插入一个点相比，对检验效果的改进微乎其微，然而，寻找这样的改进计算量巨大，故应用上只考虑插入一个点即可。

(3) 插入一个点的最优位置是取

$$q_2 = 1 - \log(q_0/q_1) / \log\left[\frac{q_0(1-q_1)}{q_1(1-q_0)}\right]$$

(4) 在研究插入多个点的序贯网图的性质时，两个插入点分别接近指标值最优。

(5) 当插入一个点，在等风险原则下且风险值在 $0 \sim 0.5$ 变化时，网图实际的两类风险几乎是设定风险值的 $1/2$ 。

3.2 充分开发利用各种准确可靠信息

第二种思路是，充分开发利用样本信息、风险信息和其他信息。

样本信息：所有检验都要采用样本信息，但历史上对样本信息的开发利用并不够。

风险信息：试验中当两类风险给定后，以往的检验常常没有做到使两类风险充分达到预定值，这造成信息浪费，应予以开发。

其他信息：如指标设计中的信息等。

这三种信息的主要特点是准确可靠，应用时不会产生分歧。统计学中讲的三种信息是总体信息、样本信息、验前信息，基于前两种信息的统计理论称为经典统计；基于这三种信息的统计理论称为贝叶斯统计。我们也说三种信息，但不属于贝叶斯范畴。

3.3 改变试验模式，全方位优化试验方案

为在同一精度下减少样本量和降低风险，必须研究建立新的统计方法。但实践中我们体会到，仅靠纯数学方法往往也难以较大幅度减少试验次数。因此，我们的第三种思路是，从改变试验模式入手，全方位优化试验方案。

4 新方法简介

4.1 计数型序贯网图检验方法

这一方法采用的是序贯样本，设样本为 $x_1, x_2, x_3, \dots$ ，它们的共同密度为 $f_\theta(x)$ ，其中 x_i 表示每次射击抽样的结果，不失一般性，设 q 表示成功率， $x_i = 1$ 表示成功， $x_i = 0$ 表示失败。 x_i 服从两点分布，即