

# 基于试验设计的RFID应用组合测试优化研究

刘禹 朱智源 关强 杨一平

**摘要** 作为物联网的核心技术之一, RFID已广泛应用到多个行业中. 而复杂的应用环境和多样化的产品设备也给RFID应用部署带来了新的挑战. 为了解决RFID应用测试中的组合爆炸问题, 本文提出一种RFID应用组合测试优化方法, 可以在多因子多水平的条件下通过正交设计在所有试验方案中均匀地挑选出最具有代表性的少数试验方案来简化测试, 并利用方差分析法获得各因子对测试结果影响的主次因素和变化规律, 协助使用者迅速建立对输入输出关系的认识. 以RFID标签应用为例进行的组合测试数据分析表明, 利用试验设计方法对RFID应用组合测试的设计方案进行优化, 可以为RFID系统部署提供有益的参考依据.

**关键词** RFID, 组合测试, 试验设计, 多因子模型

**DOI** 中图分类号TP206

## The Research on DOE-based RFID Application Combinatorial Testing Optimization

LIU Yu ZHU Zhi-Yuan GUAN Qiang YANG Yi-Ping

**Abstract** As a core technology of the Internet of Things, RFID technology prevails in many fields. However, the complexity of the actual application scenarios and the diversification of equipments have brought new challenges to RFID real-time deployment and on-site testing. To solve the problem of combinatorial explosion effectively, this paper proposes a combinatorial testing method for optimizing the RFID performance by experimental design. With the orthogonal design method under the conditions of multiple level and multiple factors, it helps users choose the representative test cases equably and simplify the tests, which is able to quickly set up the system model of inputs and outputs, and acquires main factors and patterns on the test results impacted by multiple factors. The case study on RFID tag performance combinatorial test shows that the combinatorial testing method is valid for optimizing the test cases in on-site RFID applications, it also provides useful reference to the deployment of RFID systems.

**Key words** RFID, combinatorial test, experimental design, multiple-factor model

作为物联网的核心技术之一, RFID技术具有体积小、读写速度快、使用寿命长、可重复使用、存储容量大、能穿透非导电性材料等特点, 可以在非接触条件下实现多目标识别和移动目标识别, 进一步通过与互联网技术的结合还可以实现全球范围内物品的跟踪与信息的共享. RFID技术应用于物流、制造、公共信息服务等行业, 可大幅提高管理与运作效率, 降低成本. 通过设计合理的应用测试方法和测试系统, 可以对RFID系统在实际应用环境中的性能指标进行专门测试, 评估环境因素和设备差异带来的影响, 为使用者选择合适的设备提供重要的参考<sup>[1-3]</sup>. RFID应用测试技术的研究内容包括试验方案设计与测试数据分析两项核心内容, 其中前者是为了深入考察RFID系统在实际应用环境中的性能特点, 经济地、科学地、优化地制定试验方案, 提高测试效

率的方法, 后者则是在试验数据基础上研究RFID系统性能受到环境和设备差异影响的变化规律, 为使用者提供辅助决策依据的方法.

针对RFID应用测试方法的研究自20世纪90年代中期开始出现, 多为对单一影响因子的性能测试和分析. 李秀萍等人为了了解2.45GHz的RFID标签天线受环境影响情况, 设计了从天线谐振频率的变化分析标签粘贴介质对读取性能的影响测试试验<sup>[4]</sup>, 结果表明, 塑料瓶水和玻璃瓶水均会导致标签天线的谐振频率向低端偏移, 而金属罐头瓶在距离天线0.3cm以内会导致天线不工作, 但当距离天线超过5cm时, 对天线性能的影响已经可以忽略. Clarke等人<sup>[5]</sup>和Mitsugi等人<sup>[6]</sup>也发现粘贴标签的物品及其包装材料对RFID标签的可读性有着非常显著的影响, 他们的实验是以标签的识读率作为测量值进行的. 例如对于粘贴在盛有液体的瓶子上的标签, 只有25%左右能够被有效识读, 而对于装米的罐子则有80.6%的标签能够工作, 甚至是完全空的盒子也不能达到30%的读取率. 为此, 他们设计了一些评估矩阵, 包括标签绝对灵敏度、粘贴后相对灵敏度、与金属及周围标签的谐振导致的阻抗失调

收稿日期 2010-01-18 收修改稿日期 2010-4-12  
Received January 18, 2010; in revised form April 12, 2010  
国家“863”计划资助项目(2006AA04A103)  
Supported by National High-Tech Research and Development Program of China (863) grants 2006AA04A103.  
中国科学院自动化研究所RFID研究中心 北京 100190  
RFID research center, Institute of Automation Chinese Academy of Sciences, BeiJing 100190

等,研究工作表明影响RFID设备性能的多个变量间表现出非线性的关系. Mallinson等人则设计了两个试验场景去检验信道干扰是否会对标签与读写器之间的数据通讯造成影响<sup>[7]</sup>,试验结果认为,通过一个可调衰减器来控制读写器的输出功率,并以此测量RFID标签的读取率性能会显著地带来可预测的标签响应.

以上研究作为我们分析RFID系统的实际性能起到了一定的帮助作用,但是仍然缺少合适的方法,可以帮助使用者来评估RFID系统性能在多种因子联合作用下的变化规律,以深入地认识测试对象,优化地制定试验方案,为使用者设备选型和应用部署提供更加科学、快速的指导. 针对以上问题,本文提出了基于试验设计的RFID应用组合测试优化方法,可以在多因子多水平的条件下通过正交设计在所有基准测试试验方案中均匀地挑选出最具有代表性的少数试验方案来简化测试,并利用方差分析法获得各因子对测试结果影响的主次因素和变化规律,协助使用者迅速建立对输入输出关系的认识.

## 1 RFID应用组合测试

在实际应用中,经常需要综合考虑多个因子影响以实现设备选型和现场部署的优化,这就需要进行组合测试<sup>[8]</sup>. 组合测试通过一个测试模型来对多个测试自变量同时进行分析,测试结果的可靠性更高. 但是对所有的自变量进行全组合测试需要付出非常高的代价. 假设对一款RFID标签的组合测试包括发射频率、发射功率、介质类型、标签与介质的间距、标签排列方式、标签之间的间距、标签与发射天线之间的距离、标签与发射天线之间的水平向夹角、标签群数量等9个自变量,每个自变量只取5个水平,这将产生近200万种全组合试验方案,且尚未计算为保证测试结果的精密度和正确度所做的重复测试. 显然,如果要做全组合试验,不仅要花费大量的人力、物力,还要用相当长的时间才能完成,甚至有时会因为时间过长造成试验条件的改变使试验结果失效. 因此需要借助高效的组合测试方法来解决测试中参数表达的组合爆炸问题,以在实际应用中快速、高效地产生更为可靠和有效的测试结果.

最常见的试验策略是试错法,即根据经验或随机选择不同输入变量的组合,直到产生一个可以接受的输出. 这种策略通常依赖于测试者的理论知识和实践经验,但是存在两点不足,一是无法预测测试所需要的时间,二是不能确定测试结果是否是最优解.

第二种策略可以称之为因子分解法,即通过部署测试系统和安排测试条件来保证在一次应用部署测试中绝大部分因子保持水平不变,而只改变个别

因子的水平来取得自变量和因变量之间定性的或定量的规律. 这种测试策略可以作出一系列散点图来显示输出因变量如何受到单个因子的影响,从而获得每一款测试对象的基本性能,并建立应用部署测试数据库,比较适用于实验室或第三方研究机构. 它的不足在于:无法评价因子间是否存在交互作用,因此如果选择的因子之间具有相关性,基于这种策略得到的结果往往误差较大,另外从测试效率的角度来看,因子分解法需要完成更多的测试,成本和时间的消耗更大一些.

对于绝大部分RFID应用而言,组合测试的成本和时间一旦超出一个容忍限度,使用者会立即停止,以避免对现有生产造成连续性的冲击. 为了避免这种状况的发生,还需要对组合测试的设计方案进一步进行优化,因此又提出第三种策略,即析因实验法(factorial experiment method)<sup>[9]</sup>,试验中各因子一起发生变化,试验次数降低,试验周期也相应缩短,同时通过观察试验数据的联合效应还可分析每个因子的主效应以及因子间的相互作用. 正交试验设计(orthogonal design)是在不影响试验效果的前提下,有效减少试验次数的一种方法,也使统计分析的过程也变得简单<sup>[10]</sup>,因此可以用于在RFID应用组合测试中解决组合爆炸问题. 正交试验设计的主要工具是利用正交表(orthogonal table)科学安排和分析多因子试验,通过依据正交原理设计的规划化表格均衡搭配每个因子的每种水平,使每个因子、每个水平的试验次数都相同,而任两个因子的每一种水平搭配也都有所体现,这样,虽然只做了一部分试验,但是这些试验已经可以代表全部试验.

## 2 基于试验设计的RFID应用组合测试优化方法

基于试验设计的RFID应用组合测试优化方法分为试验设计和数据处理两大部分,其核心设计步骤包括以下几点:

(1)明确试验指标和因子水平,列出因子水平表. 其中试验指标需要具有可测性,因子根据实际问题具体分析,尽量选择主要因子进行测试,一般以3~7个因子为宜,测试水平也应尽可能均匀覆盖因子的取值范围,选择相同的水平数以便于试验数据处理.

(2)选择正交表,设计表头. 正交表的列数应等于或略大于因子数,正交表的水平数也应与因子的水平数相等. 如果要求的精度较高,或需要考虑因子间的交互作用,且测试条件允许,可以选择列数远大于因子数的正交表. 表头设计是将测试因子安排到所选正交表相应的列中,如果因子数少于正交表列数,且不需要考虑交互作用,则空列可作为误差列,其位置一般放在最后.

(3)选择测试组件,根据测试方法设计基准测试系统,将试验号随机重新排序,按照新的试验号顺序在测试系统中进行试验,得到结果。

(4)利用极差分析法和方差分析法对测试结果进行分析,得到各因子对测试结果的影响排序和趋势图。

(5)分析找出存在交互作用的因子,以及剔除影响不显著的因子,对测试自变量的取值范围进行重新评估,建立输入输出函数的拟合方程。

基于以上流程设计的RFID应用组合测试,能在所有试验方案中均匀地挑选出最具有代表性的少数试验方案,在实际应用中快速、高效地产生更为可靠和有效的测试结果。

### 3 案例分析

#### 3.1 RFID标签应用组合测试模型

不同款的RFID标签产品由于在IC设计、天线设计以及封装工艺等方面均有不同,因此体现出较大的性能差异,其中一些属于产品本身的固有特性,例如RFID标签的最小功耗及寿命等,不受测试地点、测试环境的影响,另一些则与应用环境直接相关,如RFID标签粘贴的介质材料或位置等,是RFID应用测试中主要考虑的内容。

首先考虑RFID标签应用组合测试的输出因变量。ISO/IEC 18046:2006《信息技术-自动识别和数据采集技术-射频识别设备性能测试方法》<sup>[11]</sup>中给出了RFID性能测试的一般概念和影响变量,将短距离和长距离RFID设备性能测试中各种自变量对系统性能的影响定义为使用六个因变量来表达,即识别范围(identification v n range)、识别速率(identification rate)、读范围(read range)、读速率(read rate)、写范围(write range)、写速率(write rate)。可以看出,该标准中的测试对象是RFID系统整体,应用这些性能指标进行的测试无法分辨出RFID系统中的每一部分对测试结果的影响程度,例如经过测试得到了一个较小的识别范围,但究竟是由于RFID标签的功耗过大,还是读写器的接收灵敏度过低,又或是读写器天线的增益过小而造成的,却无法通过测试结果给出答案,因此也不能为使用者提供系统优化的决策依据。

RFID标签反向散射强度(Backscattering Signal Strength, BSS)以RFID标签反向散射信号的电压幅度表示,可以用频谱分析仪捕获,如图1所示。RFID标签的反向散射强度越大,其波形的相对噪声就越小,该波形被读写器正确解调的概率就越大。因此,以RFID标签的反向散射强度作为标签应用组合测试的性能指标是可测量、可重复和可对比的,直

接表现出RFID应用的有效性。

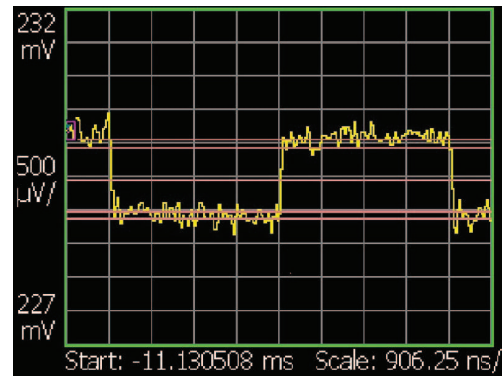


图1 UHF RFID标签反向散射强度实例图

Fig. 1 Sample case of Backscattering Signal Strength of UHF RFID tag

再考虑RFID标签应用组合测试的输入自变量。众所周知,UHF频段的被动式RFID标签是否能够产生电磁反向散射耦合现象,主要依赖于标签天线的固有频率是否能够与读写器天线辐射的电磁波频率产生谐振。当RFID标签粘贴在商品包装,如金属物体或者瓦楞纸箱上时会出现谐振频率漂移的现象,此时RFID标签是否还能正确响应读写器信号,就成为RFID系统能否正常工作的关键,这就需要测量RFID标签在不同频率和不同介质材料下的性能指标。此外,包装箱中的商品材质也可能会吸收或反射电磁波,从而影响标签的性能,因此也有必要测量RFID标签与不同介质在不同间距下的性能表现。其次,RFID标签与读写器天线之间相对位置的变化也是直接决定识读成功率的因素,需要在RFID应用测试中予以考虑。最后,应用中还包括一些不可控的环境因子,例如温度、湿度或电磁干扰等,测试实施过程中应尽量保持这些不可控因子的稳定,以获得更加准确的测试结果。

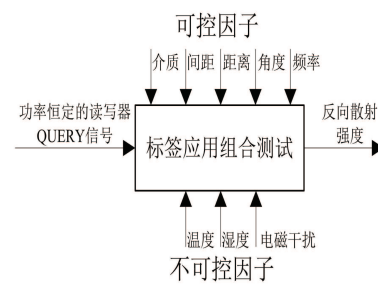


图2 RFID标签应用组合测试系统的输入输出模型

Fig. 2 The I/O model of RFID tag application combination test system

通过以上分析,我们可以获得RFID标签应用组合测试的输入输出模型,如图2所示。测试系统的输入为功率恒定的读写器QUERY信号,测试中的可

控因子包括发射频率、介质材料、间距、角度和距离,其中介质材料是离散变化自变量,其余为连续变化自变量,不可控因子包括温度、湿度和电磁干扰,输出为RFID标签的反向散射强度.初定选择5因子4水平的正交试验,因此测试水平尽量选择4水平.对于离散自变量介质材料,测试水平选择有代表性的木板、铁板、塑料板和作为参考的空气;对于连续自变量,可根据经验选择均匀取值或代表性点取值等不同策略安排水平,由此可以列出因子水平表,如表1所示.

表1 RFID标签应用组合测试的因子水平表

Table 1 The factors and levels of RFID tag application combination test

	A:介质	B: 频率	C: 角度	D: 距离	E: 间距
1	空气	860MHz	0°	65cm	0cm
2	木板	910MHz	10°	80cm	2cm
3	铁板	960MHz	20°	95cm	5cm
4	塑料	1GHz	30°	110cm	10cm

根据上述设计方案采用4水平、5因子、16个水平组合的 $L_{16}(4^5)$ 正交表,不考虑因子间的交互作用,每组测试重复10次,总的测试次数为160次,而全组合试验需要测试 $4^5 * 10 = 10240$ 次,测试工作量是正交测试设计的64倍.

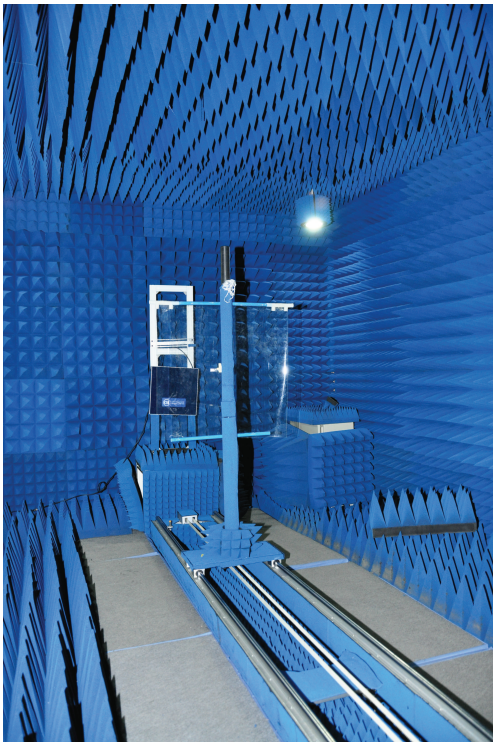


图3 RFID标签应用组合测试系统的部署

Fig. 3 The experimental environment of RFID tag application combination test

### 3.2 RFID标签应用组合测试系统构建

RFID标签应用组合测试的自变量包括发射频率、介质材料、间距、角度和距离,因此需要设计一个测试系统,实现对以上五个自变量的控制.同时,还需要考虑测试环境的稳定性,以尽量减小不可控因子对试验结果的干扰.为此,我们选择在一个大小为6米×3米×2.7米的半电波暗室中进行测试,部署图如图3所示.暗室中设有一天线转台和一水平导轨,可通过PLC控制器控制步进电机运动,实现角度和距离的变化;信号源选择矢量信号发生器ESG E4438C,能够实现0.3GHz的输出频率变化;介质材料选择0.6米×0.6米的木板、铁板和塑料板,通过顶端穿孔悬挂于水平导轨的运动端支架上;标签置于介质材料几何中心处,标签与介质材料之间的间距改变使用由聚苯乙烯材料制成的长方体来控制;信号源、频谱分析仪和控制计算机置于电波暗室外,这些仪器的射频接口和电源接口通过位于电波暗室墙上的光纤波导管与暗室内的设备相连,这样电波暗室外的设备接口发出的电磁辐射就不会对电波暗室内的电磁环境造成改变.

## 4 数据分析与探讨

RFID标签应用组合测试系统部署完毕后,还需要将正交表中的试验号随机重新排序,按照新的试验号顺序进行试验,得到测试结果如表2所示.

表2中, $K_i$ 表示任一列上水平号为*i*的测试结果之和, $k_i$ 表示任一列上水平号为*i*的测试结果的算数平均值,例如在本例中水平数为4,因此 $k_i = K_i / 4$ ,极差R表示任一列上 $k_i$ 的最大值和最小值之间的差,即 $R = \max\{k_1, k_2, k_3, k_4\} - \min\{k_1, k_2, k_3, k_4\}$ .极差反映各因子的水平改变对试验结果的影响,极差越大,说明该列所对应的因子在试验范围内的变化将导致测试结果数值上更大的变化.

可以通过趋势图来对测试结果BSS数值进行直观分析,如图4所示.趋势图是指以因子水平为横坐标,以性能指标的平均值 $k_i$ 为纵坐标表示的因子与指标之间的趋势关系,对连续变化的自变量,横坐标按照从小到大的顺序排列,并将各坐标点连成折线图,对离散自变量,则不需要考虑排序,也不必连线,其纵坐标应具有相同的比例尺,这样就可以根据趋势图的平坦或陡峭程度判断因子作用的强弱.

表2 RFID标签应用组合测试的试验结果  
Table 2 The experimental results of RFID tag application combination test

	A	B	C	D	E	BSS
1	空气	860MHz	0°	65cm	0cm	-34.846
2	空气	910MHz	10°	80cm	2cm	-30.606 3
3	空气	960MHz	20°	95cm	5cm	-38.326
4	空气	1GHz	30°	110cm	10cm	-37.375
5	木板	860MHz	10°	95cm	10cm	-32.123
6	木板	910MHz	0°	110cm	5cm	-30.581
7	木板	960MHz	30°	65cm	2cm	-27.746
8	木板	1GHz	20°	80cm	0cm	-38.626
9	铁板	860MH	20°	110cm	2cm	-36.672
10	铁板	910MHz	30°	95cm	0cm	-39.467
11	铁板	960MHz	0°	80cm	10cm	-25.575
12	铁板	1GHz	10°	65cm	5cm	-23.207
13	塑料	860MH	30°	80cm	5cm	-35.793
14	塑料	910MHz	20°	65cm	10cm	-29.399
15	塑料	960MHz	10°	110cm	0cm	-37.356
16	塑料	1GHz	0°	95cm	2cm	-26.736
K1	-141.153	-139.434	-117.737	-115.196	-150.295	
K2	-129.075	-130.052	-123.292	-130.599	-121.759	
K3	-124.921	-129.003	-143.022	-136.652	-127.907	
K4	-129.284	-125.943	-140.381	-141.984	-124.472	
k1=K1/4	-35.288	-34.858	-29.434	-28.799	-37.574	
k2=K2/4	-32.269	-32.513	-30.823	-32.650	-30.440	
k3=K3/4	-31.230	-32.251	-35.756	-34.163	-31.977	
k4=K4/4	-32.321	-31.486	-35.095	-35.496	-31.118	
极差R	4.058	3.373	6.321	6.697	7.134	

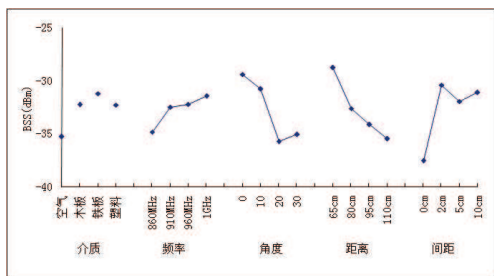


图4 RFID标签应用组合测试的趋势图

Fig. 4 The trend chart of RFID tag application combination test

从图4中可以看到, 当介质为铁板, 频率为1GHz, 角度为0°, 距离为65cm, 间距为2cm时BSS最好. 从趋势图中还可以看出, 对于该款RFID标签, 其性能随着发射频率的升高而上升, 在[860MHz, 1GHz]的频率区间内呈现出单调上升趋势, 并且在[65cm, 110cm]的距离区间内呈现出单调下降趋势, 这与电磁波在空中的自由传播规律相

符; 随着测试标签与发射天线之间夹角的增加, 性能指标呈现出先下降后上升的趋势, 大约在20°~30°之间出现拐点, 这也与发射天线的波瓣宽度有关, 在拐点之前工作在主波瓣范围内, 在拐点之后进入第一旁瓣范围内, 因此信号强度又有所增强; 测试标签所贴附的介质材料以及标签与介质之间的间距两个因子可能存在一定的交互作用, 但是可以肯定的是, 当标签与介质材料紧密相贴时受到的影响最大, 而当标签与介质之间的间距超过2cm时, 介质材料不仅没有降低标签的性能, 甚至由于介质的反射作用还使得标签反向散射的能量增强, 这给我们带来一个启示, 合理利用应用环境中介质材料对电磁波的吸收和反射作用, 可以化被动为主动, 提高RFID设备部署的可靠性.

根据表2得到的测试数据还可以进行方差分析, 其步骤为:

(1) 计算总离差平方和

$$SS_T = \sum_{k=1}^n x_k^2 - \frac{1}{n} \left( \sum_{k=1}^n x_k \right)^2 = \sum_{k=1}^n x_k^2 - \frac{T^2}{n} = 407.067 \quad (1)$$

$SS_T$ 反映了测试结果的总差异, 其值越大说明各次测试结果之间的差异越大.

(2) 计算各因子的离差平方和. 以因子A为例, 提取因子A在正交表中的某列试验结果, 看做为单因子试验, 由单因子的方差分析, 有

$$SS_A = \frac{r}{n} \left( \sum_{i=1}^r K_i^2 \right) - \frac{T^2}{n} \quad (2)$$

其中r是因子的水平数, 本例中采用等水平正交表, 因此对所有因子r=4.  $SS_A$ 反映因子A的水平变化引起的试验结果的差异, 即因子A对试验结果的影响, 同理还可求得其它因子的离差平方和, 如表3所示.

表3 各因子的离差平方和

Table 3 Sum of squares for every factor

因子	A:介质	B:频率	C:角度	D:距离	E:间距
SS <sub>j</sub>	36.660	116.951	100.619	127.454	

由于本例在设计表头时没有留有空列, 也没有考虑因子间的交互作用, 因此没有误差的离差平方和和交互作用的离差平方和.

(3) 计算平均离差平方和(均方). 由于本例采取均衡设计, 每个因子所取的水平数都是相等的, 均为4, 因此总自由度 $df_T = 15$ , 各因子的自由度均为 $df_j = 3(j \in \{A, B, C, D, E\})$ , 各因子的平均离差平方和即为各因子离差平方和与自由度的比值, 如表4所示.

表4 各因子的均方

Table 4 Mean square of every factor

因子	A:介质	B: 频率	C: 角度	D: 距离	E: 间距
MS <sub>j</sub>	12.220	8.461	38.984	33.540	42.485

从表4可以看出, 5个因子之中标签与介质材料之间的间距对试验结果的影响最大, 其次是标签与读写器天线的夹角和标签与读写器天线的距离, 而介质材料和发射频率对试验结果的影响最小. 这个结论纠正了一个传统的认识误区, 即并非RFID标签背后的介质本身对RFID系统性能造成巨大影响, 而是标签与介质材料之间的距离造成这一影响; 而根据应用环境需求对发射天线的部署位置进行合理设计也会大大改善RFID系统的应用性能; 相对来说, 发射频率的改变并没有对系统性能造成太大影响, 但这也和本次试验中发射频率设置在860MHz~1GHz这个相对较窄的范围之内有关.

需要指出的是, 通过方差分析所得到的因子主次顺序并不具有普遍性, 它只是针对所选的自变量取值而言, 评价其导致测试结果数值上的变化大小, 一旦自变量取值发生变化, 如E(间距)取值改为0cm、1cm、2cm、3cm, 那么这个因子对试验结果的影响就可能相对降低, 最终因子的主次顺序可能也将发生变化.

## 5 结论

随着RFID技术的广泛应用, 复杂的应用环境和多种多样的RFID设备给RFID系统部署和测试带来了新的挑战, 其中如何评估多种影响因子对于RFID应用效果的影响以及如何解决多因子带来的测试例程组合爆炸是目前RFID应用测试研究中急需解决的关键问题. 针对上述问题, 本文提出一种基于试验设计的RFID应用组合测试优化方法, 可以在多因子多水平的条件下通过正交设计在所有基准测试试验方案中均匀地挑选出最具有代表性的少数试验方案来对测试方案进行优化, 协助使用者迅速建立对输入输出关系的认识.

以RFID标签应用组合测试的优化过程为例, 证明了正交试验设计作为一种非常实用的解决组合爆炸问题的工具, 可以在多因子多水平的条件下迅速制定测试计划, 并根据少量测试的试验结果对因子的影响程度和因子间的交互作用进行判断, 以便进行更加深入的数据分析和输入输出建模. 借助试验设计方法, 可以达到优化RFID应用组合测试的设计方案, 降低测试工作量, 提高测试效率的目的.

## References

- Jarwala M, Le D, Michael S. End-to-End Test Strategy for Wireless Systems. In: Proceedings of International Test Conference. Washington D.C., USA, October 21–25 1995. 940–946
- Murfett D. The Challenge of Testing RFID Integrated Circuits. In: Proceedings of the 2nd IEEE International Workshop on Electronic Design, Test and Applications. Perth, Australia, January 2004. 410–412
- Yingcai, W., C. Ka-Kei, Q. Huamin, Y. Xiaoru and S. C. Cheung. Interactive Visual Optimization and Analysis for RFID Benchmarking. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2009, **15**(6):1335–1342
- LI Xiu-ping, LIU Yu. Printed Dipole Antenna Measurement Affected by Surrounding Objects for RFID Application. *Chinese Journal of Electron Devices*, 2007, **30**(4): 1289–1291  
(李秀萍, 刘禹. 基于RFID应用的印刷偶极子天线受环境影响测试. 电子器件, 2007, **30**(1): 1289–1291)
- Clarke R H, Twede D, Tazelaar J R and Boyer K. Radio Frequency Identification (RFID) Performance: The Effect of Tag Orientation and Package Contents. *Packaging Technology and Science*, 2006, **19**: 45–54
- Mitsugi J, Kaneda K, Yamagata A. Characterizing UHF RFID Readability for Product Packaging of Consumer Electronics. In: Proceedings of the 3rd RFID Academic Convocation, Shanghai, China, Oct 26–28, 2006.
- Mallinson H, Hodges S, Thorne A. Determining a Better Metric for RFID Performance in Environments with Varying Noise Levels. In: Proceedings of 12th IEEE International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics, 2006.
- S.C. Cheung, W.K. Chan, Penny M.K. Lee, Lionel M. Ni, Peter Ng. A Combinatorial Methodology for RFID Benchmarking. in Proceedings of the 3rd RFID Academic Convocation, Shanghai, China, October 26–28, 2006.
- Montgomery D C. Design and Analysis of Experiments; 6th edition. New Jersey: John Wiley and Sons, Inc., 2005.
- Luan Jun. The Technology and Methods of Experimental Design[M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 1987. (栾军. 试验设计的技术与方法[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1987.)
- ISO/IEC Information Technology - Automatic Identification and Data Capture Techniques - Radio Frequency Identification Device Performance Test Methods, ISO/IEC TR 18046, 1st Edition, 2006



刘禹 中国科学院自动化研究所助理研究员, 主要研究方向为RFID系统测试及应用部署. 本文通信作者.

E-mail: yu.liu@ia.ac.cn

(Liu Yu Assistant Professor at the Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. His research interest covers RFID benchmarking methodology and

real-life deployment.)



**朱智源** 中国科学院自动化研究所硕士研究生. 主要研究方向为RFID测试和应用开发.

E-mail: zhuzhiyuan698@gmail.com

**(Zhu Zhi-Yuan** Graduate student at Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. His research interest covers the test and application development of RFID.)



**关强** 中国科学院自动化研究所助理研究员, 主要研究方向为RFID测试技术与部署、线性系统控制与优化.

E-mail: qiang.guan@ia.ac.cn

**(Guan Qiang** Assistant Professor at the Institute of Automation, Chinese

Academy of Sciences. His research interest includes RFID Testing methodology and deployment, linear systems control and optimization.)



**杨一平** 中国科学院自动化研究所研究员, 主要研究方向为语义信息处理及物联网应用架构.

E-mail: yiping.yang@ia.ac.cn

**(Yang Yi-Ping** Professor at the Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. His research interest covers semantic information processing and infrastructure of Internet of Things.)