

doi: 10.7690/bgzdh.2015.04.005

一种 SMA 同轴微带连接器的优化设计

蔡晓涛, 于德江, 王慧峰, 石 岩

(北京无线电计量测试研究所, 北京 100039)

摘要: 为了提高 SMA 同轴微带连接器的电性能指标, 提出一种新设计的 SMA 同轴微带连接器。该连接器采用 2 个绝缘支撑限位固定内导体和外导体的相对位置。连接器的尾部采用外导体零件进行压接装配, 保证了连接器的机械可靠性; 外导体和绝缘支撑没有开孔灌注环氧树脂胶, 从根本上规避了连接器的电磁泄漏隐患; 并通过仿真优化, 整个连接器具有较小的电压驻波比以及较低的插入损耗。采用共面补偿测试方法, 所设计的连接器在工作频率范围内, 测试电压驻波比 $VSWR < 1.13$, 插入损耗 < 0.15 dB, 电磁泄漏 < -90 dB, 较现有的 SMA 型同轴微带连接器的性能指标都有明显改善。

关键词: 同轴连接器; 微带; 电压驻波比; 插入损耗; 电磁泄漏

中图分类号: TP212 **文献标志码:** A

Optimization Design of a SMA-type Coaxial Micro-strip Connector

Cai Xiaotao, Yu Dejiang, Wang Huifeng, Shi Yan

(Beijing Institute of Radio Metrology & Measurements, Beijing 100039, China)

Abstract: Presents a new design of SMA coaxial micro-strip connector in order to improve the SMA coaxial micro-strip connector electric performance index. Two insulated mediums are adopted to fix the relative location of the inner conductor and outer conductor of the proposed connector. A part is pressed into the end of the proposed connector as a part of the out conductor so as to ensure the dependability of the designed connector. The structure of no holes in the outer conductor and the insulated mediums is adopted to avoid the problem of electromagnetic leakage. The proposed connector has good performance of low VSWR and low inserting loss by optimization design. By adopting the improved measurement method of coplanar-offset, the proposed SMA-type coaxial micro-strip connector has good performance, $VSWR < 1.13$, inserting loss < 0.15 dB, electromagnetic leakage < -90 dB, which are all better than the performance of current connector.

Keywords: coaxial connector; micro-strip; VSWR; inserting loss; electromagnetic leakage

0 引言

SMA 系列射频连接器是由 Bendix 公司在 20 世纪 50 年代开发研制的, 由于其具有体积小、采用螺纹连接、机械性能稳定等优点, 目前已经广泛应用于航空、航天、雷达、微波通信、仪器仪表等领域^[1]。微带线作为一种非常流行的平面传输线, 由于可以用照相印制工艺来加工, 而且很容易与其他无源和有源微波器件集成, 所以广泛用于各种微波器件中。微带电路要与外界的同轴传输系统连接, 就必须使用同轴微带连接器进行过渡。SMA 同轴微带连接器就是一种常用的同轴微带过渡器件。

目前, 国内常用的 SMA 同轴微带连接器大多采用外导体和绝缘支撑开孔, 内导体增加台阶, 通过灌注环氧树脂胶将外导体、绝缘支撑和内导体进行固定。虽然这种结构可以有效解决内导体与外导体之间的定位问题, 且具有较好的机械性能, 但是在外导体和绝缘支撑上开孔灌注环氧树脂胶在一定

程度上破坏了整个连接器的阻抗匹配特性, 从而使采用这种结构特点的连接器的电性能指标不是太好, 具体表现为电压驻波比偏高, 插入损耗较大, 而且存在一定的电磁泄漏隐患。

连接器电性能的优劣直接影响与其所连接电子系统的性能指标^[2]。为了提高 SMA 同轴微带连接器的电性能指标, 规避连接器的电磁泄漏隐患, 同时具有较好的机械可靠性, 笔者提出了一种 SMA 同轴微带连接器的优化设计方法。

1 连接器结构

常见的 SMA 同轴微带连接器主要由内导体、外导体和绝缘支撑 3 部分组成。为了支撑和固定内导体与外导体的相对位置, 内、外导体之间设计有绝缘支撑。目前绝缘支撑的常用材料有聚四氟乙烯、聚乙烯、聚苯乙烯等^[3]。为了保证连接器具有较好的性能指标, 连接器内每一段应该具有较好的阻抗一致性^[4]。同轴微带连接器的特性阻抗公式为:

收稿日期: 2014-10-29; 修回日期: 2014-12-03

作者简介: 蔡晓涛(1985—), 男, 陕西人, 硕士, 工程师, 从事微波器件与天线的设计研究。

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \frac{D}{d} \quad (1)$$

式中： Z_0 为连接器的特性阻抗，常用值有 50Ω 和 75Ω ； ϵ_r 为绝缘介质的介电常数； D 和 d 分别为外导体的内径和内导体的外径^[5]。

同轴微带连接器是用于在同轴传输线和微带传输线之间过渡传输射频微波信号的器件。目前，国内常用的 SMA 同轴微带连接器大多采用外导体和绝缘支撑开过孔，通过灌注环氧树脂胶将外导体、绝缘支撑和内导体进行固定。这种现有的 SMA 同轴微带连接器的结构示意图如图 1 所示。从图中可以看出：这种连接器通过在外导体和绝缘支撑上开过孔，破坏了整个连接器的阻抗一致性，而且具有一定的电磁泄漏隐患。

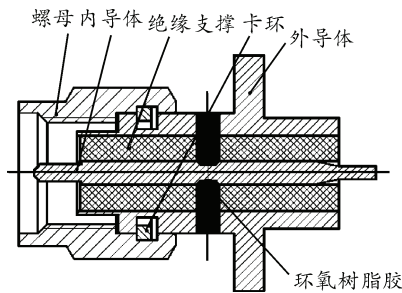
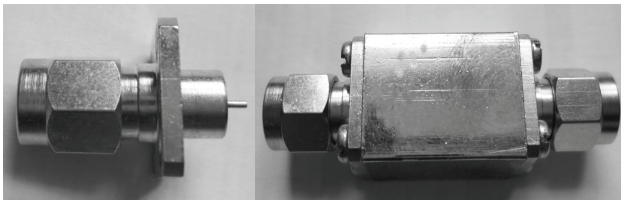


图 1 SMA 同轴微带连接器的旧结构

笔者采用优化方法设计了一种 SMA 同轴微带连接器 SMA-JFD。该连接器采用 2 个绝缘支撑限位固定内导体，尾部采用外导体零件进行压接装配，保证了整个连接器的机械可靠性。由于外导体和绝缘支撑不再开过孔，所以从根本上规避了连接器的电磁泄漏隐患。通过采用电磁仿真软件 Ansoft HFSS 11.0 对影响连接器的重要参数进行了仿真优化，整个连接器具有较小的电压驻波比和较低的插入损耗。所设计的同轴微带连接器 SMA-JFD 的实物及测试工装分别如图 2 中(a)和(b)所示。



(a) SMA-JFD 实物图 (b) 测试工装图

图 2 新设计的 SMA-JFD 的实物及测试工装照片

2 设计及分析

由于常用仪器设备的特性阻抗为 50Ω ，为了实现阻抗匹配，所设计的 SMA 同轴微带连接器也

采用 50Ω 特性阻抗，即式 (1) 中 $Z_0=50 \Omega$ 。由式 (1) 可得，影响射频连接器阻抗特性的参量有绝缘支撑的介电常数 ϵ_r ，外导体的内径 D 和内导体的外径 d 。设计的 SMA 同轴微带连接器的绝缘支撑采用聚四氟乙烯材料，其介电常数为 $\epsilon_r \approx 2.02$ ，将聚四氟乙烯绝缘支撑的介电常数 ϵ_r 带入公式 (1) 计算可得

$$\frac{D}{d} \approx 3.27 \quad (2)$$

即，采用绝缘支撑部分的外导体与内导体直径之间的比值满足式 (2) 和式 (3) 的关系。同理，从连接器的结构图中可以看出，绝缘介质部分采用空气介质，其介电常数为 $\epsilon_r \approx 1$ 。将空气绝缘介质的介电常数带入公式 (1) 计算可得

$$\frac{D}{d} \approx 2.3 \quad (3)$$

即，采用空气介质部分的外导体与内导体直径之间的比值满足公式 (3) 的关系。

利用基于有限元法 (FEM) 的电磁仿真软件 Ansoft HFSS 11.0 对 SMA 同轴微带连接器进行建模仿真并对重要结构参数进行优化^[6]。在 HFSS 中所建立的 SMA 同轴微带连接器的模型如图 3。从该仿真模型可见：所优化设计的 SMA 同轴微带连接器不再采用在外导体和绝缘支撑上开孔灌注环氧树脂胶的方法，而是通过采用台阶限位的方式，对连接器的外导体、内导体和绝缘支撑进行机械限位。

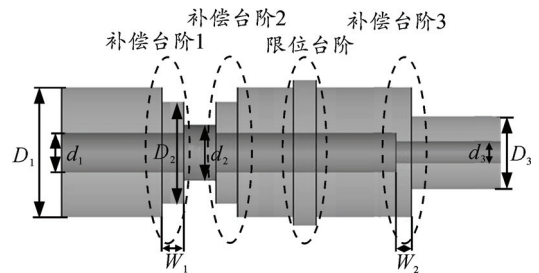


图 3 SMA-JFD 同轴微带连接器的 HFSS 模型

由于所设计的连接器存在台阶限位，不可避免地破坏了连接器的阻抗连续性，故引入了不连续电容。为使设计的连接器获得较好的电性能指标，采用阻抗共面补偿方法，对引入的不连续电容补偿。

如图 3 中所示，同轴线 D_1 和 d_1 与 D_2 和 d_2 分别满足公式 (1) 的 50Ω 阻抗特性，其绝缘介质分别为聚四氟乙烯和空气。但这两段同轴线之间存在台阶，为了补偿这些台阶所带来的不连续电容，采用共面补偿设计，补偿部分如图中所示。引入的补偿绝缘支撑的厚度一般应小于外导体的内径，即

$W_1 < D_1$ ^[7]。根据加工要求，选择 $W_1=0.7$ mm。图 4 给出了所设计的同轴微带连接器 SMA-JFD 的电压驻波比性能 VSWR 随共面补偿台阶 1 的直径 D_2 的变化曲线。从图中可以明显看出，补偿台阶的直径对连接器的电压驻波比特性有一些影响，根据连接器对电压驻波比性能的要求，选择 $D_2=3.0$ mm。

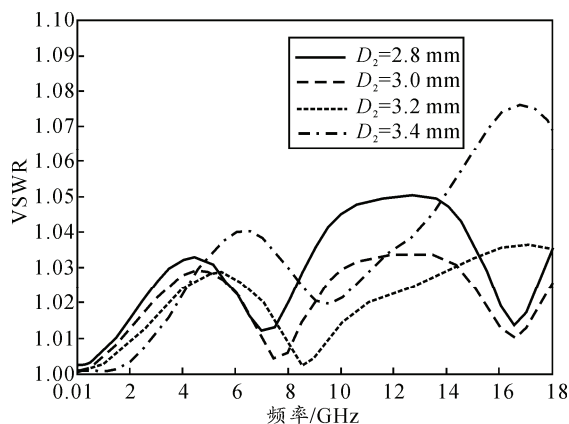


图 4 仿真的补偿台阶直径 D_2 对 VSWR 特性的影响

同轴微带连接器的端口伸出段的内导体是用来连接微带线的。文中所设计的微带连接器伸出端同轴线 D_3 和 d_3 满足 50Ω 阻抗特性。但与同轴线 D_1 和 d_1 之间存在台阶，不可避免地引入了不连续电容。为了使连接器获得较好的阻抗匹配特性，如图 5 中所示，引入了共面补偿台阶 W_2 。图 6 给出了该补偿台阶的宽度 W_2 对连接器电压驻波比性能指标的影响。从图中可以明显看出：补偿台阶的宽度对连接器的电压驻波比特性有明显的影 响，根据连接器对电压驻波比性能指标的要求，选择 $W_2=0.5$ mm。

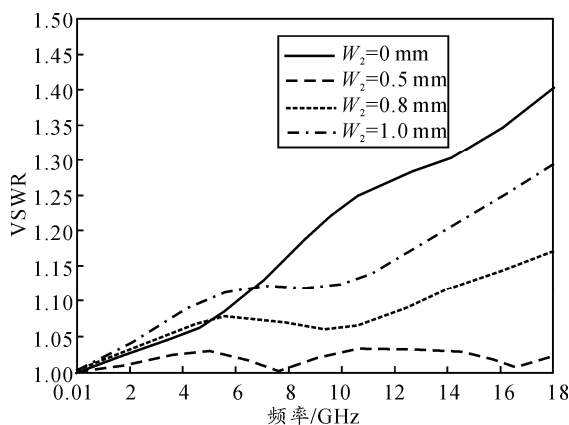


图 5 仿真的补偿台阶宽度 W_2 对 VSWR 特性的影响

笔者通过采用机械限位，共面补偿等方法，有效改善了所设计微带连接器的性能指标。图 6 给出了笔者优化设计的同轴微带连接器和图 1 所示的现有同类型同轴微带连接器的端口电压驻波比仿真结

果比较图。从图中可以看出，文中提出的同轴微带连接器明显改善了连接器的电压驻波比性能。

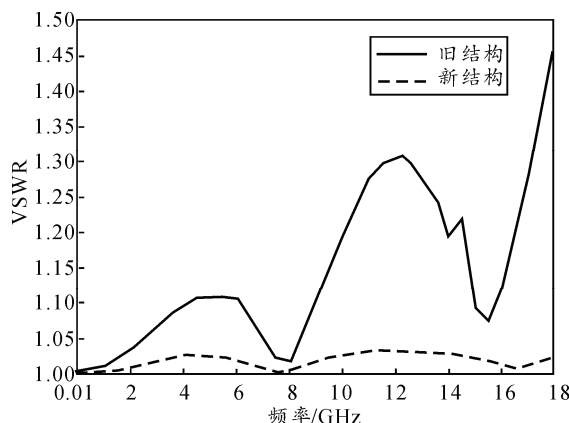
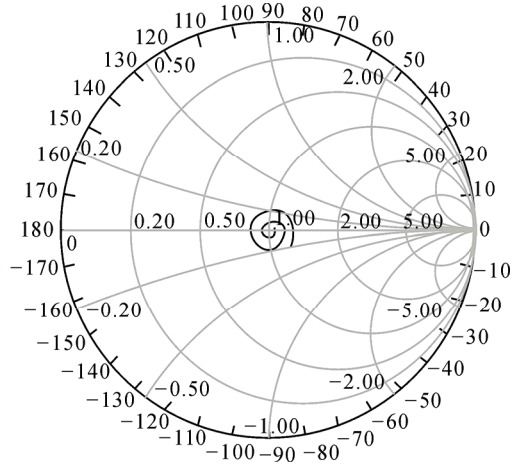
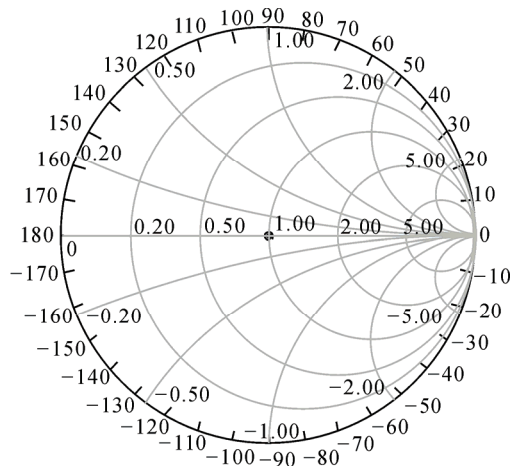


图 6 新旧结构电压驻波比仿真结果比较



(a) 旧结构设计



(b) 新结构设计

图 7 仿真的连接器新旧结构设计的 Smith 阻抗圆

图 7 给出了仿真的同轴微带连接器新旧结构的 Smith 阻抗圆图。由阻抗圆图可以明显看出：通过改进结构设计，新设计的同轴微带连接器的阻抗匹配特性在工作频率 $0.01 \sim 18$ GHz 范围内得到了明

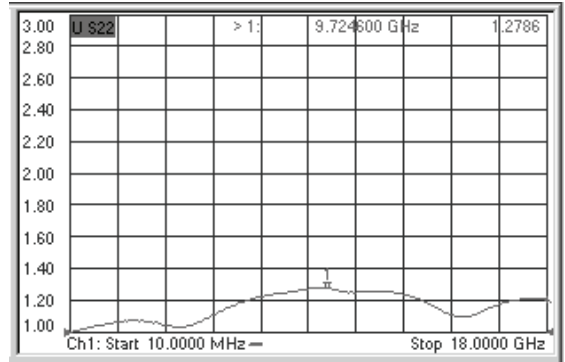
显改善，从而说明了文中所提出的 SMA 同轴微带连接器具有更好的阻抗匹配特性，从而具有更好的电性能指标。

3 测试及结果

为了验证所设计的 SMA 同轴微带连接器的产品性能，根据仿真结果实际加工生产了产品实物。为了更加准确地反映所设计结构特性的优劣，笔者提出了一种同轴微带连接器测试工装，通过一段同轴线连接 2 个同轴微带连接器，在端口连接处增设了共面补偿垫片，从而有效改善了测试时的测试工装阻抗不连续性对连接器测试结果的影响，更加准确地反映了测试结果。通过矢量网络分析仪 Agilent E8364B 对所设计的同轴微带连接器 SMA-JFD95 实物进行测试，得到了如图 2(b)中所示的连接器的端口电压驻波比和整体插入损耗。图 8 和图 9 分别给出了电压驻波比和插入损耗测试结果。

根据 GJB976—2009 规定，单个连接器的电压驻波比值是通过插合对的电压驻波比值的均方根确定的，如公式 (4)^[8]。依据图 8 所示的端口电压驻波比测试结果，通过计算可得所设计的单个连接器的电压驻波比 $V_{SWR_{连接器}} < 1.13$ 。

通过矢量网络分析仪测试得到的插入损耗是由一对连接器的插入损耗和测试夹具所引入的插入损耗共同组成，如公式 (5)。而其中测试夹具由于选用的是一段同轴线，可以通过同轴线衰减公式 (6) 计算可得^[9]。在式 (6) 中， $L_{同轴}$ 是一段同轴线的衰减，dB/100ft； f 为工作频率，MHz； Z_0 为连接器的特性阻抗； D 和 d 分别为外导体的内径和内导体的外径； $\tan\Delta$ 为绝缘介质的损耗角正切； ϵ_r 为绝缘介质的介电常数。通过计算可知，在 10 GHz 时，介质材料为聚四氟乙烯，内、外导体直径分别为 1.27 mm 和 4.1 mm 的 10 mm 长同轴线的衰减约为 0.3 dB^[10]。从而通过公式 (5) 计算可得单个连接器的插入损耗 $L_{连接器} < 0.15$ dB。



(b) 端口 2

图 8 测试的微带连接器 2 个端口的电压驻波比特性

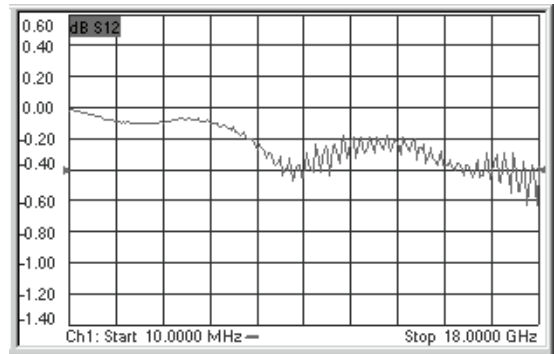


图 9 测试的整体插入损耗特性

$$V_{SWR_{连接器}} = \sqrt{V_{SWR_{测试}}} \quad (4)$$

$$L_{测试} = 2L_{连接器} + L_{夹具} \quad (5)$$

$$L_{同轴} = \frac{0.435\sqrt{f}}{Z_0} \left(\frac{1}{d} + \frac{1}{D} \right) + 2.78 \tan \Delta \sqrt{\epsilon_r} f \quad (6)$$

通过使用 Agilent E8251A 信号源，Agilent E4440A 频谱仪以及 ETS 混响室测试得到了如图 2 所示的整个测试系统工装的电磁泄漏特性。图 10 给出了新设计的 SMA 同轴微带连接器和现有的图 1 所示的微带连接器的测试电磁泄漏性能对比图。从图中可见，新设计的结构相比较旧结构，电磁泄漏提高了大约 10 dB，电磁泄漏性能得到明显改善。

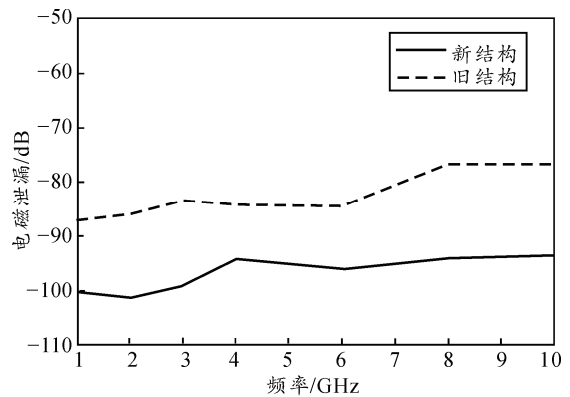
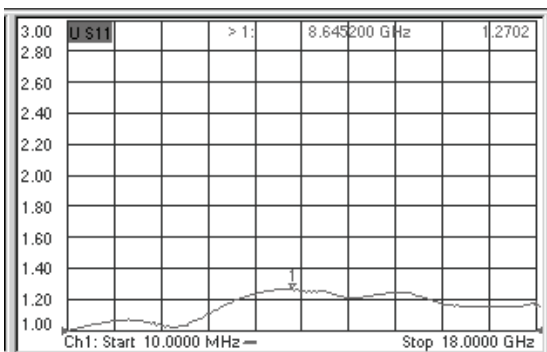


图 10 测试的新旧结构电磁泄漏对比



(a) 端口 1

4 结论

通过优化设计,该连接器采用2个绝缘支撑限位固定内导体和外导体的相对位置,尾部采用外导体零件进行压接装配,保证了连接器的机械可靠性。外导体和绝缘支撑没有开孔灌注环氧树脂胶,从根本上规避了连接器的电磁泄漏隐患。通过仿真设计,整个连接器具有较小的电压驻波比,较低的插入损耗以及更小的射频泄漏。采用改进后的共面补偿测试方法,所设计连接器在工作频率0.01~18 GHz范围内,测试电压驻波比 $VSWR_{\text{连接器}} < 1.13$ 、插入损耗 $L_{\text{连接器}} < 0.15 \text{ dB}$ 。在频率1~10 GHz范围内,电磁泄漏 $< -90 \text{ dB}$ 。改进后的SMA同轴微带连接器较现有的同类型微带连接器的性能指标得到了明显改善。

参考文献:

[1] N han, E, Lafferty, P M, et al. Radio-Frequency Connector and Interconnect Reliability In Space borne

(上接第14页)

3) 突出“三个着力点”抓建。

一是抓好现有问题整改,针对部队和生产验收中暴露的问题,系统梳理,全面整改,重点提高装备的可靠性。这里所讲的“问题”也是广义的,还包括虽然符合规范图纸要求,但不满足部队实际需要,或有待进一步提升改进的方面,需要用实战、实训的标准去衡量;二是抓好精品标准确立。标准决定质量,有什么样的标准就有什么样的质量。要研究制订不同行业、不同产品的精品标准,为精品装备论证研制、制造验收提供遵循;三是抓好基础能力提升,承制单位要加大对关键原材料、元器件,关键加工、制造工艺的攻关,下决心在一些基础性、前沿性领域取得突破,大力发展拥有自主知识产权的国防关键技术和核心技术。

Applications[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, Part A, 1995, 18: 163-169.

- [2] 蔡晓涛,于德江,王慧峰,等.一种配接N型射频连接器的电缆组件设计[J].宇航计测技术,2013,33(15):23-26.
- [3] 冯良平,徐岚.射频同轴连接器设计要点[J].国外电子测量技术,2005,24(11):39-44.
- [4] 贾斌.射频同轴电缆组件的构成及装配[J].电子工艺技术,2006,27(6):329-332.
- [5] 李明德.扩频连接器及扩频方法[J].Electromechanical Components,2002,22(4):3-9.
- [6] 李明成,于少军. Ansoft HFSS 在直角弯式射频连接器设计中的应用[J].机电元件,2007,27(4):27-29.
- [7] 李明德.降低射频同轴连接器电压驻波比的方法探讨[J].机电元件,2011,31(3):33-42.
- [8] 国家军用标准 GJB 976A—2009[S].
- [9] MIKE GOLIO. 射频与微波手册[S].孙龙祥,等.译.北京:国防工业出版社,2006.
- [10] Reinhold Ludwig. 射频电路设计-理论与应用[J].2版.王子宇,译.北京:电子工业出版社,2013:30-33.

5 结束语

提高武器装备质量,是做好军事斗争准备和装备建设发展的迫切需要。笔者论述了实施精品工程的重要意义,分析了精品装备的科学内涵和打造精品面临的矛盾难题,并提出了强化“四种意识”抓建,围绕“四全思路”抓建和突出“三个着力点”抓建的举措,可为进一步做好军事斗争准备和装备建设发展提供理论参考。

参考文献:

- [1] 张玉平,王有成,赵铜星,等.区间直觉模糊决策在联合作战指挥员能力评估中的应用[J].兵工自动化,2013,32(11):45-48.
- [2] 贺剑锋,高新东,李瑾.未来战争武器装备生产能力建设思考[J].兵工自动化,2014,33(10):4-6.
- [3] 鱼静,董树军,王书敏,等.信息化条件下陆军武器装备作战体系的网络化分析方法[J].兵工自动化,2014,33(10):68-71.