

应用半导体激光器缩比仿真微波着陆系统辐射源研究

何晶, 吴德伟, 蒙文, 苗强
(空军工程大学信息与导航学院, 西安 710077)

摘要: 针对微波着陆系统仿真试验的辐射源模型选用问题, 提出以大的缩比系数将半导体激光器作为微波系统辐射源缩比仿真模型, 研究了微波系统和半导体激光器辐射信号的物理相似性, 分析了二者的辐射强度、频谱特性、信号场型以及极化方式等主要相似性能, 并采用三菱激光器进行了微波着陆系统辐射源缩比模型的仿真实验, 实现了对微波着陆系统工作过程的模拟, 验证了运用半导体激光器缩比仿真微波电磁系统辐射源的可行性, 为在实验室以较小的空间缩比仿真大型电磁系统性能提供了新的方法手段, 同时也丰富了电磁缩比仿真理论。

关键词: 半导体激光器; 微波着陆系统; 辐射源; 缩比仿真

中图分类号: V271.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2014)02-0017-05

Using Semiconductor Laser Scaling Models as Radiation Source in Simulation of Microwave Landing System

HE Jing, WU De-wei, MENG Wen, MIAO Qiang
(College of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: It is difficult to choose or produce an appropriate radiation source for electromagnetic environment simulation of Microwave Landing System (MLS). We proposed to use a semiconductor laser with a big scale factor as the simulation model microwave radiation source. The physical similarities between the microwave and the radiation signal of semiconductor laser, such as the radiation intensity, spectrum characteristics, radiation field and polarization mode etc, were analyzed. A semiconductor laser was used for simulation of MLS radiation source scale model, and simulation of MLS operating process was realized. The result shows the feasibility of this method, which provides a new means for studying large electromagnetic system using small scale model simulation in laboratory.

Key words: semiconductor laser; microwave landing system; radiation source; scale model simulation

0 引言

缩比模型仿真(或缩比模型试验)是以相似理论为基础,在试验中用实物放大或缩小的模型来观察系统性能和参数的试验研究^[1]。在电磁系统仿真领域,很早就出现了基于相似理论对电磁系统进行缩比仿真实验的技术,应用在雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS)测量、无线电系统场地环境测试等方面,产生了一些缩比系统并提供了有效的实验数据和结论^[2]。

本文针对大型电磁系统辐射源的缩比仿真问题,研究以较大的缩比尺度,运用现代激光技术,采用半导

体激光器缩比仿真微波电磁系统辐射源,为在更小的空间里开展电磁系统工作性能分析和电磁散射特性的评估提供新的方法手段,实现在实验室内仿真微波着陆系统(Microwave Landing System, MLS)工作过程、研究机场场地环境对MLS导航性能影响的目标。

1 激光器缩比仿真微波辐射源的物理相似性

1.1 微波辐射源发射信号工作模型

微波辐射源发射系统可以用图1所示的工作模型表示。其中,振荡源产生高频振荡,反映为在电路里激起交变电流,而电流是电子在导体内的群运动,这个交变电流就是具有一定分布形式的电子群的往返运动。给形成交变电流的电子群建立一个模型(如图1所示的菱形),这个模型就是导体内横截面(垂直于电力线的平面)电子密度渐变的电子群。又因为交变电流是

收稿日期:2012-12-19 修回日期:2013-05-06

基金项目:国家自然科学基金(61104056)

作者简介:何晶(1978—),女,新疆昌吉人,博士,副教授,研究方向为导航系统建模与仿真。

这个模型的往返运动形成的,所以又把该模型称为振荡模。之所以形成这样的振荡模,是因为在选频式振荡器中具有储能元件电感、电容,或是在腔体式振荡器中振荡空间里的电子受电场作用出现群聚的缘故。

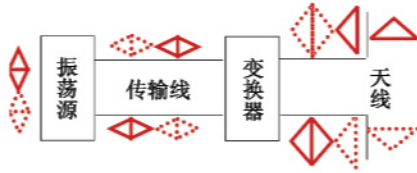


图1 微波辐射源的工作模型

Fig. 1 The working model of microwave radiation

振荡模在传输线中运行,变换器对振荡模进行放大、调制等处理,后经传输线送往天线,激起电磁波,振荡模在天线中的运动,是电子的集群运动。假如这个振荡模的长度(沿电力线方向的尺寸)为 L ,整个模振荡时,对振荡模中的单个电子而言,其振动范围都为 L ,那么所引发的电磁波波长是与 L 成正比的。换句话说,菱形振荡模的纵向尺寸反映了所激起的电磁波的波长(频率),而模内所包含的参与振动的电子数目决定了所激发出的电磁波的强度,这个电子数目主要由菱形振荡模的横向最大尺寸(模幅)反映,模幅越大电流越大(实质是单位横截面上的电子密度越大),激起的电磁波能量也就越强。

1.2 半导体激光器发光机理建模

半导体激光器的核心是激光二极管(LD),能直接产生激光。现代物理光学对激光二极管工作过程的解释是:构成半导体晶体的原子内部,占据高能带(导带)的电子能够在外电流作用下跃迁到低能带(价带)上,将期间的能量差以光子的形式释放出来,在一定的条件下,这些光子能以光波的形式辐射出去;而处于低能带上的电子,也可以受光子的激励作用重新跃迁到高能级上,为下一次的从高向低的跃迁做好准备,或被外电路提取(探测)形成电流^[3-4]。

如图2a所示,LD通常是在有源层两个端面上设置两个平行放置的解理面(又称腔镜),与PN结内的偶极层共同构成所谓的谐振光腔,并且其中一个腔镜通过镀膜等技术对光波具有强反射能力,使得在腔内形成的光波能够由另一腔镜透射出去^[5]。理想情况下,希望LD输出的是单频光波,这主要取决于PN结中费米能级的厚度和谐振光腔的结构^[6]。

在这个光腔内,电子在费米能级间跃迁,单个电子的振动逐渐稳定并保持下来。把谐振光腔中单电子的振动看作单振荡模型,以双向箭头短线表示,见图2a。每个振荡模都将产生一个光波,一次振荡对应的光波就是所谓的光子。能够持续地激起光波的单振荡模,其产生的光波存在频率与相位的差异。由于腔的作

用,只有某些波长的光波能够聚集并达到一定的能量辐射出去。用单振荡模的长度反映所产生的光子的频率,那么同长度的振荡模共同辐射形成光波的原理,类同于微波辐射源阵列天线中各单元振子发射信号在空间场的叠加。所不同的是,这个天线阵不仅是二维平面的,而且是具有三维厚度的。

早在微波技术与天线理论中就已提出电基本振子(又称电流元或电偶极子)的概念,只是那时认为孤立的电基本振子是不存在的^[7]。而在LD中,完全可以把各个单振荡模看成为电基本振子,它们整合起来就构成了一个辐射光波的天线阵。实际上,同一费米能级上的电子在能级间跃迁的结果,相当于这些电子对应的单振荡模联合激起了单频光波,因而也可以将单频光波的产生归因于具有线阵布局的振荡模辐射光波合成的结果,如图2b所示。应当注意的是,这个线阵上的振荡模起始振荡时刻可能有所不同,所以虽然线阵上的各振荡模尺寸(电子振荡范围)相同,但振荡的先后并不一致,用图2b的点划曲线表示出这一情况。

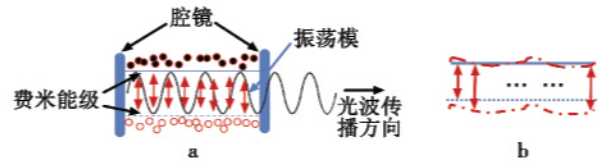


图2 LD发光原理示意图

Fig. 2 Light emitting principle of LD

2 微波辐射源与LD辐射信号相似特性分析

由上文的分析可见,微波辐射源与LD具有相同的辐射信号及发光机理,具备用于缩比仿真的相似性物理基础,而采用半导体激光器缩比仿真微波辐射源,还需要分析二者在如场(光)强、场型、频谱特性和极化方式等主要性能方面的相似性问题。

1) 辐射场强相似性分析。

电磁波的辐射强度可以用电磁场任一位置的功率密度来表示^[7]

$$S = \frac{P_t D_t}{4\pi r^2} \quad (1)$$

式中: P_t 为天线发射的功率; D_t 为天线阵方向性因子; r 为接收天线与天线阵电中心的距离。式(1)中, P_t 可以依据量子力学中对电磁场基本例子的描述来定义,即可以认为微波辐射源中的菱形振荡模内包含的电子数目与天线发射功率 P_t 成正比,也就是说,在频率(振荡模沿电力线方向的长度)确定的情况下,振荡模的模幅越大,发射功率就越大。而在LD中,可以认为参与跃迁并稳定振荡的电子越多,出光的功率也就越大。

二者所不同的是:微波辐射源采用阵列天线,如一维线阵天线,功分器将天线发射功率分配给各个单元振子,相当于给每个单元振子馈送一个模幅很小的振荡模进行联合辐射;而 LD 则相当于一系列模幅压缩为一个电子的单振荡模发射光子,LD 发出的激光就等效为馈送单电子振荡模的一维非线性阵天线辐射的电磁波信号,或者说 LD 方向性很强的光束就是这个一维非线性阵天线辐射信号的场型。

因此,无论是微波辐射源还是半导体激光器,其辐射强度都正比于产生光量子的振荡电子数目,具有相同的物理性质。然而,LD 功率不能像微波辐射源发射机那样进行测量,而是通常以供电电源所提供的电流大小来量测,每一种 LD 都具有一个电源电流与出光功率的关系曲线,但在光场中,各点处的光强也同样可以采用式(1)的功率密度来表示。

2) 频谱特性相似性分析。

辐射源的频谱特性反映了发射信号的频率纯度和频带宽度。微波辐射源的频谱特性参数通常是带内寄生抑制、带外寄生抑制和谐波寄生抑制等;LD 的频谱特性用中心波长、光谱宽度以及光谱模数 3 个参数来描述。光谱范围内辐射强度最大值所对应的波长为中心波长 λ_0 ;光谱范围内辐射强度最大值下降 50% 处所对应波长的宽度称之为谱线宽度 $\Delta\lambda$,简称线宽;光谱模数则是指激光器所产生的光谱范围内中心波长 λ_0 的个数。

对于采用腔体式振荡器的辐射源而言,如采用的是密闭金属体谐振腔,所产生的电磁波频率取决于谐振腔尺寸。一般微波辐射源谐振腔的尺寸与所产生电磁波的波长处于同一量级,这时谐振腔就只能在腔内所能激起的电磁振荡的最低模次(基波)上振荡,即为单模(基频)信号。而对于光波这样极短波长的信号,若在谐振腔内仍只要最低模次振荡,则谐振腔尺寸须缩小到不现实的情况。所以,半导体激光器产生的通常是多模(多个中心波长 λ_0)激光,其模数取决于设计的光学谐振腔尺寸大于光波长的程度。为了取得单模次激光,可以采取降低激光工作物质的增益,只让一个需要的振荡模次满足阈值条件,或者在谐振腔内插入色散元件等一系列增大模次损耗差距的选模方法来设计制作单模激光器^[4]。

半导体激光器波长特性一般由有源层的厚度和有源层与两边封闭层间的折射率所决定,其形状近似高斯分布^[5]。图 3a 是用于模拟微波着陆系统角度引导设备发射机的三菱激光器的频谱特性,在阈值电流 40 mA 情况下,其中心波长约为 658.1 nm,线宽 $\Delta\lambda \approx 0.2$ nm。而

微波着陆系统辐射信号频谱如图 3b 所示,在中心频点 $f_0 = 5061$ MHz 上,3 dB 带宽约为 200 kHz。二者 3 dB 带宽与中心频率的比值(相对带宽)分别是万分之三和十万分之四。尽管二者的相对带宽相差了一个量级,但从模拟的角度只要二者的接收处理系统工作方式(均为接收信号的幅值测量)一致,则二者只需频谱形状相近即可。可见,三菱激光器频谱特性是能够用来模拟微波着陆系统辐射信号频谱特性的。

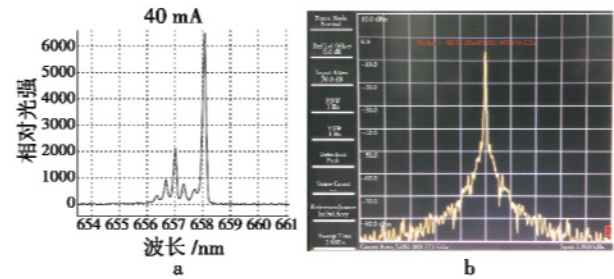


图3 三菱激光器与MLS辐射源光谱特性比较

Fig.3 Spectral characteristic comparison between laser and MLS radiation

3) 辐射场型相似性分析。

在分米波以上的微波频段,辐射源通常采用阵列式天线,主要目的是形成方向性很强的辐射场型,起到集中辐射能量的作用。而阵列天线之所以能够形成方向性很强的辐射场型,是由于组成阵列天线的各单元振子辐射的信号在某一方向上激起的感应信号同相叠加,感应电势表现最强;而在另一些方向上可能反相互相抵消,感应电势表现为零。通常,天线的口径(线阵天线的长度)越大,形成的辐射波束越窄,方向性也就越强。

上文提到 LD 出光相当于非线性阵天线辐射的电磁波信号。激起单频光波的单振荡模型在 LD 的有源层内按电子在半导体晶格内的布局有序排列,从出光的方向看去如同成排的线阵天线构成层叠的阵列天线方阵。把单电子振荡模型在 LD 有源层内部有序排列情况用图 4a 的形式表示。设 x 轴平行于有源层横截面的长边, y 轴平行于短边, z 轴垂直于横截面。在所建坐标系的 (x,y) 面内,振荡模均匀排列,如同一个由电基本振子构成的线阵天线,并且这个线阵天线还在 z 轴上顺序排列。依照天线辐射信号原理,LD 辐射信号的远场场型主要由 (x,y) 面内的线阵天线决定,即在水平内的波瓣宽度取决于有源层的横截面宽度,而垂直面内的波瓣宽度则取决于横截面的高度(有源层的厚度)。图 4b 是一种典型的 LD 光场形式,在 x 轴和 y 轴方向的波束张角(半功率波瓣宽度)典型值分别为 $10^\circ \sim 20^\circ$ 和 $25^\circ \sim 40^\circ$ 。

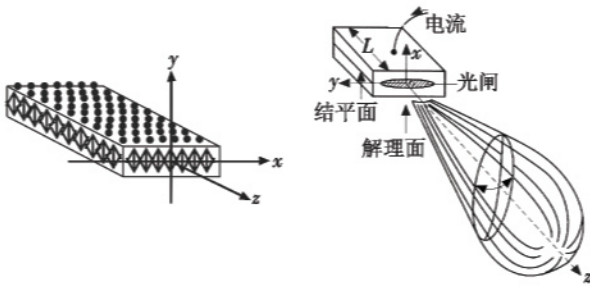


图4 LD发射光束示意图

Fig.4 Schematic diagram light beam of LD

微波辐射系统通常采用一维线阵天线,以某型微波着陆系统采用的42单元振子构成的线阵天线为例,单元振子间距33.0 mm,单元振子的馈电以天线阵电中心为对称采用同相的修正 Taylor 分布函数,经仿真计算得到该线阵天线在水平面内(线阵轴线平行于水平面)的归一化方向图,如图5所示。可以看出,所得到的天线阵水平面波束宽度约为2.9°,副瓣电平平均小于-35 dB,而这个天线阵在垂直面内的方向图则主要取决于单元振子的垂直面方向性。一般为了集中能量都要在辐射方向的背面增加反射装置,其结果就很像图4b所示的LD产生的光场形状。

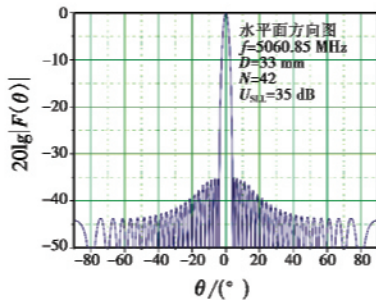


图5 单元泰勒阵列的归一化方向图

Fig.5 Normalized directional diagram of Taylor antenna array

由图可见,对于MLS辐射系统来说,其相控阵天线辐射波束形状在水平面内的扇面宽度是极窄的(0.5°~3.0°),而在垂直面的扇面宽度约为20°。因而不能用三菱激光器的光场直接模拟MLS系统天线辐射的场型。但可采用光束整形技术来解决这一问题,如利用薄透镜变换高斯光束的束腰半径,通过压缩光束的发散角达到聚焦的目的,实现使用半导体激光器对微波辐射源的模拟仿真。

4) 极化方式相似性分析。

阵列天线辐射信号的极化形式取决于采用的单元振子形式和这些单元振子的布置方式。如采用对称振子的天线阵,振子轴线方向相对于地平面水平布置时为水平极化波,垂直布置时为垂直极化波(如图6所示)。在LD有源层中,单电子振荡模可以视为对称振子,只不过它所发出的是单光子电磁波信号,而不是像

对称振子那样发出的是群光子电磁波信号,即LD中的单电子振荡模只相当于菱形振荡模中的一个电子行为。可见,LD发光信号的极化方向取决于有源层横截面的y轴方向。如为了模拟MLS辐射信号的极化形式,可将LD有源层横截面的y轴方向垂直于水平平面,即辐射垂直极化光波。

3 微波着陆系统缩比模型仿真实现

3.1 MLS工作原理及其性能评测问题

MLS是一种飞机精密进近着陆引导系统,具有提供多种进近路径、对场地要求低、工作波道数多、受电磁干扰影响小等优点。微波着陆系统包括地面和机载设备两大部分,地面设备的角度部分又包括方位引导设备和仰角引导设备,其工作频率为5031.0~5090.7 MHz,采用时基波束扫描测角体制。以方位引导设备为例,方位窄扇形扫描波束水平面的标准波束宽为0.5°~3.0°,垂直面的扇面宽度为20°,在以跑道中心线为对称中心的±40°范围内做水平扫描。每当波束扫掠过安装有MLS机载设备的飞机后,就会在机载接收机中产生一个高频脉冲,往返扫掠的结果就可以获得一对具有一定间隔时间的脉冲对,测量这个间隔时间就能得到相对方位角度信息。

方位引导设备测角原理如图6所示,测角公式为

$$\theta = \frac{(T_0 - t)v}{2} \tag{2}$$

式中:θ为方位角或仰角;T₀为相对零度的往返扫描波束中心的间隔时间;t为往/返扫描波束中心之间的间隔时间;v为扫描角速度(20000(°)/s)。

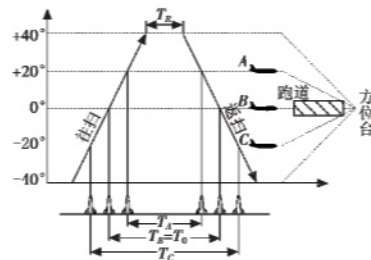


图6 MLS测角原理示意图

Fig.6 Angle measurement principle of MLS

3.2 MLS缩比模型光学仿真系统

图7所示的MLS缩比模型光学仿真系统^[8]包括主控计算机、地面设备仿真机、机载设备仿真机、方位引导设备模拟装置(方位台)、仰角引导设备模拟装置(仰角台)、进近飞机接收器(机载光接收器)几部分。仿真实验是由主机负责仿真进程的开始/停止,由地面设备仿真机输出的控制信号分别触发方位天线扫描装置和仰角天线扫描装置在不同的时隙工作,由其发送的同步信号送往机载设备仿真机,控制角度处理的方位/仰角接

收机模型在不同的时隙工作;机载光接收器将处理过的扫描脉冲视频信号送入机载设备仿真机,机载设备仿真机按照由地面设备仿真机收到的同步信号选择方位/仰

角接收机模型工作,得出飞机的实时方位角和仰角,送入主机显示,也可在机载设备仿真机显示,得到导航误差。在仿真过程中,可在主机端任意改变仿真参数。

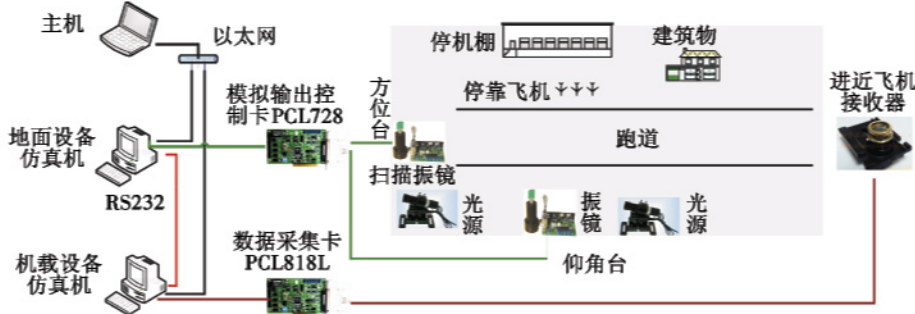


图7 MLS及其场地环境缩比模型半实物仿真连接示意图

Fig. 7 Hardware-in-loop scale model simulation system structure of MLS and the work site

仿真系统采用三菱激光器(波长为658.1 nm)和ST8061型扫描振镜,模拟微波辐射源及其扫描过程。扫描振镜是反射镜扫描的一种实现形式,是一种由驱动板与高速摆动电机组成的高精度、高速度伺服控制系统,通过设置振镜系统的转动速率、偏转方式、偏转范围等实现振镜的控制,实现MLS相控阵天线波束扫描的模拟。机载光接收器采用的光电集成电路OPT301,是美国Burr-Brown公司生产的集光电二极管和电压/电流转换放大器于一体的光电集成器件。数据采集卡PCL-818L接收机载光接收器接收到的光脉冲信号,送入机载设备仿真机进行信号处理。为保证系统工作的实时性,机载设备仿真机采用xPC快速原形化方案,即在计算机上建立机载接收机信号处理的Simulink模型,然后通过xPC目标环境转换成实时应用程序下载到目标机上运行。PCL-818L接收到的信号波形采用xPC中的host scope3在宿主机上显示,如图8所示。两个脉冲是扫描振镜控制LD光束一次往返扫描,在机载光接收器经光电转换获得的信号,其脉冲间隔时间与机载光接收器所处的水平面方位角(或垂直面俯仰角)相对应。

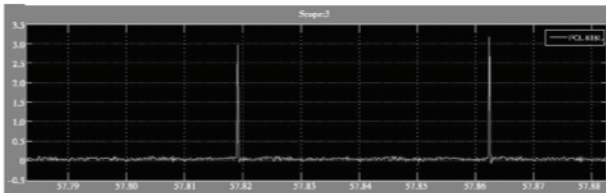


图8 PCL-818L接收到的信号波形

Fig. 8 The signal wave received by PCL-818L board

4 结束语

本文依据相似理论实现了运用半导体激光器对MLS辐射源的缩比仿真:一方面能够解决在实验室环境里仿真分析微波着陆系统工作性能和辐射信号受场

地和障碍物影响的散射特性,提高系统导航精度和可靠性;另一方面也提供了一种电磁系统缩比仿真的新方法,丰富了电磁缩比仿真实理论。后续将逐步对激光器光信号偏振检测以及大尺度非精确缩比目标散射特性等问题进行更深入的研究。

参考文献

- [1] 王精业,杨学会,徐豪华. 仿真科学与技术的发展及其理论体系[J]. 计算机仿真, 2006, 23(1): 1-4.
WANG J Y, YANG X H, XU H H. Development of simulation science and technology and its theory system [J]. Computer Simulation, 2006, 23(1): 1-4.
- [2] LOPEZ A R. Scanning-beam microwave landing system-multipath-errors and antenna-design philosophy [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1997, 25(3): 147-156.
- [3] 钟锡华. 现代光学基础[M]. 北京: 北京大学出版社, 2003: 31-35.
ZHONG X H. Modern fundamentals of optics [M]. Beijing: Peking University Press, 2003: 31-35.
- [4] 安梳英,刘继芳,曹长庆. 激光原理与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 89-93.
AN S Y, LIU J F, CAO C Q. Laser principle and technology [M]. Beijing: Science Press, 2010: 89-93.
- [5] 吕百达. 固体激光器[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2003: 87-90.
LÜ B D. Solid state lasers [M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2003: 87-90.
- [6] DANYLOV A A, GOYETTE T M, WALDMAN J. Frequency stabilization of a single mode terahertz quantum cascade laser to the kilohertz level [J]. Optics Express, 2009, 17(9): 7525-7532.

(下转第35页)

4) 可靠性分析。按照上述步骤1)~3), 重复完成1000个样品性能参数的距离分析, 得到1000组距离时间序列及距离失效阈值。按照文献[4]中的方法, 采用单性能参数退化轨迹分析的方法获得各样品的伪失效时间, 而后采用寿命统计分析方法获得产品的可靠度函数, 如图2所示。

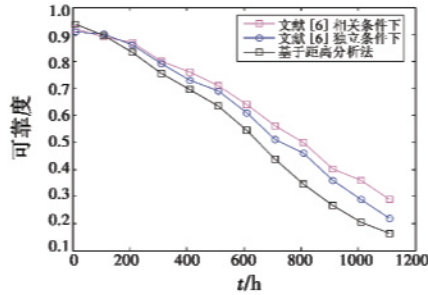


图2 基于距离分析的产品可靠度分析结果

Fig.2 Reliability analysis result based on the distance analysis

从图2中可以看出, 采用本文方法进行可靠性分析的结果与文献[6]中的方法结果接近, 说明通过多元性能参数距离能够很好地反映产品的可靠性变化趋势, 当产品的性能参数增多、监测频率及监测时间增大的时候, 基于距离分析的可靠性分析方法能大大减小计算量, 并且不用考虑性能参数之间的相关性及多元概率密度函数的假设。

4 结束语

本文提出了基于多性能参数距离分析的可靠性评估方法, 提出多元性能参数的参数距离定义, 给出各个性能参数在距离分析中加权因子的确定方法, 并首次提出多性能参数失效距离的概念, 最后结合实例验证了本文方法的有效性。本文提出的方法为多元性能参数的可靠性分析提供了新思路, 解决了现有方法基于多元正态联合概率密度函数假设, 以及求解过程较复杂等不足。然而多性能参数经过降维处理分析时, 失

效阈值应该综合考虑, 本文提出的距离失效阈值的问题有待进一步研究和完善。

参考文献

- [1] 胡锦涛. 基于多元退化量的可靠性评估方法研究[J]. 控制工程, 2007, 14(7): 77-80.
HU J T. Study on reliability evaluation approach based on multivariate degradation measures[J]. Control Engineering of China, 2007, 14(7): 77-80.
- [2] 钟强晖. 基于多元退化数据的可靠性分析方法[J]. 系统工程理论与实践, 2011, 31(3): 544-551.
ZHONG Q H. Reliability analysis approach based on multivariate degradation data[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2011, 31(3): 544-551.
- [3] 舒服华. 改进灰色关联分析在铸造型砂品质评价中的应用[J]. 铸造技术, 2007, 28(1): 15-18.
SHU F H. Application of improved grey relation analysis on the evaluation of quality of molding sand[J]. Foundry Technology, 2007, 28(1): 15-18.
- [4] 邓爱民. 高可靠长寿命产品可靠性技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2006: 26-50.
DENG A M. Research on reliability technology of high-reliability and long-lifetime products[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006: 26-50.
- [5] 赵建印. 基于性能退化数据的可靠性建模与应用研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2005: 18-34.
ZHAO J Y. Study on reliability modeling and applications based on performance Degradation[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005: 18-34.
- [6] PENG W. System reliability prediction based on degradation modeling considering field operating stress scenarios[D]. New Jersey: The State University of New Jersey, 2003: 78-99.
- [7] 曹祥玉, 高军. 微波技术与天线[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2008: 138-141.
CAO X Y, GAO J. Microwave technology and antenna [M]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology Press, 2008: 138-141.
- [8] 苗强. 微波着陆系统及其场地环境缩比模型仿真研究[D]. 西安: 空军工程大学, 2010.
MIAO Q. Study on the scale model simulation of MLS and Site environment[D]. Xi'an: AFEU, 2010.

(上接第21页)