

模糊相似产品法与综合评判法结合的柴油机可靠性预计

杜 丽, 张晗亮, 黄洪钟, 刘 宇

(电子科技大学机械电子工程学院 成都 611731)

【摘要】针对工程中柴油机可靠性预计所需数据不足和可信度不高的问题, 根据模糊数适于量化模糊信息的特点, 运用模糊集和区间分析理论, 将模糊数和相似产品可靠性预计法相结合, 提出了一种模糊相似产品和模糊综合评判相结合的柴油机可靠性预计方法, 并用其对柴油机空气压缩机的可靠度进行了模糊预计。该方法既充分利用了旧机型的可靠性数据, 又结合了技术专家的实际经验和决策判断, 实现了确定性信息和不确定信息的互补, 具有工程实用价值。

关键词 柴油机; 模糊综合评判; 模糊数; 模糊相似产品; 可靠性预计

中图分类号 TB114.3

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2010.04.033

Combining Fuzzy Similar Product and Fuzzy Comprehensive Evaluation Method for Reliability Prediction of Diesel Engine

DU Li, ZHANG Han-liang, HUANG Hong-zhong, and LIU Yu

(School of Mechatronics Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 611731)

Abstract To solve the problems such as the insufficiency of the required data and the low credibility in reliability prediction for diesel engine in engineering, this paper utilizes the property of fuzzy number which is suitable for quantifying fuzzy information and combines the fuzzy sets and the traditional similar product method by using fuzzy sets theory and interval analysis. Then it puts forward a new reliability prediction method which combines the fuzzy similar product method and the fuzzy comprehensive evaluation, which is then used to do the fuzzy prediction on the reliability of the diesel engine's air compressor. This method not only makes sufficient use of the reliability data of the old machine type, but also combines the experts' practical experiences and judgments. It realizes the mutual complement of the fixed information and the uncertain information. This method has the practical value in engineering.

Key words diesel engines; fuzzy comprehensive evaluation; fuzzy sets; fuzzy similar product method; reliability prediction

柴油机综合了热力学、动力学、结构和控制学等多学科知识, 并且对重量、体积、寿命和可靠性要求很高, 属于多发性故障、多故障模式类别的复杂机电产品, 其可靠性统计数据往往会因为统计方法的不同而有很大的差异, 因而适用于新型柴油机的可靠性预计的数据往往不足或者可信度不高。影响柴油机可靠性的因素很多, 并具有一定的模糊性。柴油机的可靠性预计实质上是权衡众多因素的决策问题, 传统的数学方法如结构参数法、专家打分法等很难给出合理可信的预计结果^[1-3]。文献[4]提出了一种基于模糊数的综合评判模型对燃气轮机进行可靠性预计。该模型依赖相关专家的经验进行决策, 使用模糊理论将精确评判扩展到模糊评判, 从而较客观地描述实际情况。

目前, 国内外对可靠性预计的相关研究主要都集中在对单一模糊综合评判的基础上^[4-7]。绝大部分的新型柴油机是在原有型号上改进的, 所以其原有型号的可靠性试验数据以及维修信息对新产品的可靠性预计具有很大的指导作用。而以单一模糊综合评判为基础的可靠性预计方法往往忽视了相似产品的可靠性数据对新机型可靠性数据的影响, 实际的预计效果并不理想。本文综合相似产品法和模糊综合评判方法, 建立了一种柴油机设计的可靠性预计模型。

1 柴油机的可靠性预计

柴油机主要由机体和附件系统等子系统串联组成。在不同的研究阶段, 柴油机可靠性预计的对象

收稿日期: 2008-09-10; 修回日期: 2009-02-25

基金项目: 国家863计划(2007AA04Z403); 国家自然科学基金(50775026); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20060614016)

作者简介: 杜 丽(1970-), 女, 副教授, 主要从事可靠性设计方面的研究。

是不同的。在设计初期,应把子系统级作为可靠性预计的对象^[4-6]。只要分别预计出每一个子系统的可靠性,就可以根据可靠性模型预计出柴油机整机的可靠性。因此,本文将以柴油机子系统的可靠性为研究对象,阐述基于相似产品法与模糊综合评判方法的可靠性预计方法。

1.1 模糊相似产品预计方法

本文提出的模糊相似产品预计方法是对传统相似产品方法的改进。传统方法用确定数描述产品旧机型的缺陷数、新机型减少的缺陷数和新增的缺陷数,既不合理也不准确。本文引入模糊数的概念,并结合专家的实际经验和技術能力,以提高预计的准确度。

1.1.1 传统的相似产品预计方法

相似产品预计方法利用成熟的相似柴油机所得到的经验数据预计新型柴油机的可靠性。由于柴油机属于非电产品,查不到故障率数据,成熟柴油机的可靠性数据来自试验数据和维修信息^[8]。

假设存在与新型柴油机子系统相似的旧型柴油机子系统 M ,其可靠性试验数据及外场维修数据中获得的可靠性指标为:

$$\lambda_a = k_1 d_a \quad (1)$$

式中 k_1 为比例系数; d_a 为可能缺陷数。

新型柴油机子系统的可靠性指标为:

$$\lambda_b = k_1 d_r \quad (2)$$

式中 d_r 为新设备具有的可能缺陷数,则有:

$$d_r = d_a + d_n - d_e \quad (3)$$

式中 d_n 为新增加的缺陷数; d_e 为已经被排除的缺陷数。

由式(1)~(3)可得新型柴油机子系统的可靠性指标为:

$$\lambda_b = \lambda_a \left(\frac{d_a + d_n - d_e}{d_a} \right) \quad (4)$$

当已知旧型柴油机子系统的可靠度 R_a 时,则新型柴油机子系统的可靠度为:

$$R_b = R_a \left(\frac{d_a + d_n - d_e}{d_a} \right) \quad (5)$$

由于 d_a 、 d_n 、 d_e 不能确定,具有一定的模糊性。所以,引入模糊数描述产品的缺陷数,既能减少获取产品缺陷数精确值的难度,又能结合有关技术专家的实际经验和判断构造模糊数的隶属函数,从而较准确地描述产品的缺陷数量。

1.1.2 模糊数

定义 1^[9] 模糊数 \tilde{A} 是在论域 $(+\infty, -\infty)$ 上的连续

模糊子集,其凸隶属函数满足:

$$\max_{x \in R} \mu_{\tilde{A}}(x) = 1 \quad (6)$$

定义 2 设 L 、 R 为模糊数的参照函数,若有:

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} L\left(\frac{m-x}{\alpha}\right) & x \leq m, \alpha > 0 \\ R\left(\frac{x-m}{\beta}\right) & x > m, \beta > 0 \end{cases} \quad (7)$$

则称模糊数 \tilde{A} 为 L-R 型模糊数,并记 $\tilde{A} = (m, \alpha, \beta)_{L-R}$,其中 m 为 \tilde{A} 的均值, α 、 β 分别为 \tilde{A} 的置信上下限。以工程上常用的三角模糊数为例,其参照函数为:

$$\begin{cases} L\left(\frac{m-x}{\alpha}\right) = \max\left(0, 1 - \frac{m-x}{\alpha}\right) & x \leq m, \alpha > 0 \\ R\left(\frac{x-m}{\beta}\right) = \max\left(0, 1 - \frac{x-m}{\beta}\right) & x > m, \beta > 0 \end{cases} \quad (8)$$

对应的三角模糊数 \tilde{A} 的隶属函数为:

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} 0 & x < m - \alpha \text{ 或 } x > m + \beta \\ 1 - \frac{m-x}{\alpha} & m - \alpha \leq x \leq m \\ 1 - \frac{x-m}{\beta} & x < m + \beta \end{cases} \quad (9)$$

若一个三角模糊数 $\tilde{A} = [(m - \alpha), m, (m + \beta)]$,则它的 λ 截集为:

$$\tilde{A}_\lambda = [(m - \alpha) + \alpha\lambda, (m + \beta) - \beta\lambda] \quad (10)$$

1.1.3 模糊相似产品预计方法

设参与缺陷数赋值的相关技术专家人数为 n ;模糊数 \tilde{d}_{ai} ($i=1, 2, \dots, n$) 是第 i 个专家给旧型柴油机子系统存在的缺陷数的赋值; \tilde{d}_{ai} 的 λ 截集 $\tilde{d}_{ai}^{(\lambda)} = [a_{ai}^{(\lambda)}, b_{ai}^{(\lambda)}]$ 。置信水平 λ 是指 $\tilde{d}_{ai}^{(\lambda)}$ 隶属于模糊集合 \tilde{d}_{ai} 的可能性, λ 越高,可能性越大;置信区间越小,模糊性越弱。

根据经典扩张运算公式, \tilde{d}_a (旧型柴油机子系统存在的缺陷数的赋值)的 λ 截集为:

$$\tilde{d}_a^{(\lambda)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \tilde{d}_{ai}^{(\lambda)} = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_{ai}^{(\lambda)}, \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n b_{ai}^{(\lambda)} \right] \quad (11)$$

同理,可以分别求出 \tilde{d}_n 的 λ 截集 $\tilde{d}_n^{(\lambda)}$ 和 \tilde{d}_e 的 λ 截集 $\tilde{d}_e^{(\lambda)}$,最终得到新型柴油机子系统的可靠度为:

$$\tilde{R}_b^{(\lambda)} = R_a \frac{(\tilde{d}_a^{(\lambda)} + \tilde{d}_n^{(\lambda)} - \tilde{d}_e^{(\lambda)})}{\tilde{d}_a^{(\lambda)}} \quad (12)$$

1.2 模糊综合评判预计方法

1.2.1 柴油机子系统可靠度的因素集和备择集

首先建立影响子系统可靠度的因素集 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$;其次,以相似柴油机子系统统计

出的可靠度为基础, 估计新的子系统的可靠度, 建立备择集 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$ [10]。

1.2.2 影响可靠度因素的权重集

由于各个影响因素对可靠度的影响程度不同, 所以需建立影响因素权重集 W 。确定权重的方法有多种, 本文选用专家评分法, 因为该方法能利用相关专家的经验弥补决策信息的不足。通过专家评分法, 得到权重集 $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)$ 。

1.2.3 单因素的模糊评判

由于决策信息欠缺, 单因素模糊评判的结果必定具有模糊性, 用确定值表示评判结果既不合理也不准确。本文采用模糊数, 得到的单因素模糊评判矩阵为 $\tilde{K} = (\tilde{k}_{ij})_{n \times m}$, \tilde{K} 表示因素集与备择集之间的一种模糊关系; 模糊数 \tilde{k}_{ij} 表示二元组 (u_i, v_j) 隶属于该模糊关系的隶属度, 如果有多名专家进行评分, 加权平均后得到 \tilde{k}_{ij} 。

1.2.4 模糊综合评判

模糊综合评判是在单因素模糊评判的基础上考虑影响因素的权重 [11-12], 即:

$$\tilde{x} = W \circ K = (\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_m) \quad (13)$$

式中 \tilde{x} 和 \tilde{x}_j 分别表示评判集和模糊综合评判指标。为了得到预计的子系统可靠度 \tilde{R}_c , 采用加权平均法对模糊综合评判指标做进一步的处理, 即将 \tilde{x}_j 作为权数, 以对各个备择元素 v_j 进行加权平均的值作为评判结果, 则:

$$\tilde{R}_c = \frac{\sum_{j=1}^m \tilde{v}_j \tilde{x}_j}{\sum_{j=1}^m \tilde{x}_j} \quad (14)$$

设模糊数 \tilde{k}_{ij} 的 λ 截集 $k_{ij}^{(\lambda)} = [a_{ij}^{(\lambda)}, b_{ij}^{(\lambda)}]$, 由式(11)和式(13)得到置信水平为 λ 时的评判指标 $x_j^{(\lambda)}$, 即:

$$x_j^{(\lambda)} = \left[\sum_{i=1}^n w_i a_{ij}^{(\lambda)}, \sum_{i=1}^n w_i b_{ij}^{(\lambda)} \right] \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (15)$$

根据式(14)可以计算出置信水平为 λ 时的柴油机子系统的可靠度, 即:

$$\tilde{R}_c^{(\lambda)} = \left[\frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n v_j w_i a_{ij}^{(\lambda)}}{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n w_i b_{ij}^{(\lambda)}}, \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n v_j w_i b_{ij}^{(\lambda)}}{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n w_i a_{ij}^{(\lambda)}} \right] \quad (16)$$

针对不同的 λ 值, 用上述方法可以预计出不同置信水平下子系统可靠度的置信区间。

1.3 综合的预计结果

通过分析上述两种方法, 又考虑到新型柴油机的设计并非完全重新设计, 一般都是在原有的机型和子系统上进行改进、改良和提高。所以考虑两种

方法的融合, 新型柴油机的可靠度可由下式决定:

$$\tilde{R}_s = w_1 \tilde{R}_b + w_2 \tilde{R}_c \quad (17)$$

式中 \tilde{R}_b 、 \tilde{R}_c 分别为由模糊相似产品方法和模糊综合评判方法得到的柴油机子系统的可靠度; w_1 、 w_2 分别为两种方法对应的权重系数, 由专家评分的方式决定, 最后再归一化处理。本文不再阐述具体的方法。在设计新机型时, 如果结构、技术、工艺等方面比旧机型有很大的提高, 则 w_2 可以取得相对高一些; 如果新机型的改进比较少或者用户对模糊综合评判信任度较小时, w_1 可以取得相对高一些。对于给定的置信水平 λ , 柴油机子系统的可靠度为:

$$\tilde{R}_s^{(\lambda)} = w_1 \tilde{R}_b^{(\lambda)} + w_2 \tilde{R}_c^{(\lambda)} \quad (18)$$

2 实例分析

以某一型号柴油机的空气压缩机的可靠度预计为例, 阐述本文的模型应用。用该方法同样也可以预计出其他子系统的可靠度, 进而预计整个柴油机的可靠度。根据其他的柴油机空气压缩机的统计数据和使用经验, 空气压缩机的可靠度一般为0.96。现有4位专家对 d_a 、 d_n 、 d_e 进行评判, 其模糊值如表1所示。

表1 专家对各种缺陷参数的评判

各种缺陷	专家			
	No.1	No.2	No.3	No.4
d_a	(14,1,2)	(13,2)	(14,1)	(13,2)
d_n	(4,1,2)	(3,2)	(4,1)	(3,1)
d_e	(6,2,1)	(5,1)	(5,1,2)	(6,1)

根据上述条件, 由模糊相似产品方法计算得出新型柴油机空气压缩机的可靠度为:

$$\tilde{R}_b = [0.947 \ 03, 0.979 \ 47]$$

而当置信水平 λ 为0.9时, 由式(11)和式(12)可以计算得到新型柴油机空气压缩机的可靠度为:

$$\tilde{R}_b^{(0.9)} = [0.964 \ 12, 0.967 \ 41]$$

对于模糊综合评判方法, 以影响空气压缩机可靠度的因素为元素, 建立因素集, 即:

$$U = \{u_1, u_2, u_3, u_4\} = \{\text{设计, 工艺, 制造, 材料}\}$$

为了提高评判的准确性, 备择集的数值范围应该适当大于预计的可能范围, 而且备择元素不宜过多。因此备择集设为:

$$V = \{0.94, 0.95, 0.96, 0.97, 0.98\}$$

为了方便专家对影响因素权重进行评分, 将评分范围设为1~8分, 所评分数为整数, 分数越高的评分表示越重要。4位参与评判的专家所给出的评判如表2所示。

表2 专家对影响因素权重的评分

影响 因素	专家			
	No.1	No.2	No.3	No.4
设计	8	8	8	8
工艺	6	5	7	6
制造	5	5	6	5
材料	7	6	6	6

加权平均和归一化处理, 得到权重集为:

$$W = (0.313\ 7, 0.235\ 3, 0.205\ 9, 0.245\ 1)$$

单因素的模糊评判矩阵为:

$$\tilde{K} = [\tilde{k}_1, \tilde{k}_2, \dots, \tilde{k}_4]^T$$

为了方便专家的评判, 将单因素模糊评判的模糊评语分为3个等级:

(1) 有可能是 m , 采用模糊数 $(m, 0.2)$ 表示;

(2) 可能是 m , 采用模糊数 $(m, 0.1)$ 表示;

(3) 很可能是 m , 采用模糊数 $(m, 0.05)$ 表示。

本文规定 $m \in [0, 1]$ 。应注意若 $m + \delta_R > 1$, 则取 $m + \delta_R = 1$; 若 $m - \delta_L < 0$, 则取 $m - \delta_L = 0$ 。

表3列出了4位专家针对影响因素各自进行的单因素模糊评判。

表3 专家对设计单因素进行的模糊评判

备择 元素	专家			
	No.1	No.2	No.3	No.4
0.94	(0.30, 0.05)	(0.20, 0.05)	(4.00, 0.10)	(0.30, 0.05)
0.95	(0.75, 0.05)	(0.80, 0.20)	(0.80, 0.05)	(0.85, 0.05)
0.96	(1.00, 0.05)	(0.90, 0.05)	(1.00, 0.20)	(1.00, 0.05)
0.97	(0.90, 0.05)	(1.00, 0.05)	(1.00, 0.10)	(1.00, 0.05)
0.98	(0.70, 0.05)	(0.80, 0.05)	(0.85, 0.20)	(0.60, 0.05)

用模糊权重计算程序求平均模糊数, 可得到对因素的平均评判结果为:

$$\tilde{k}_1 = [(0.300\ 0, 0.062\ 5), (0.800\ 0, 0.087\ 5), (0.975\ 0, 0.087\ 5), (0.975\ 0, 0.062\ 5), (0.737\ 5, 0.087\ 5)]$$

采用同样的方法, 可以得到对其他因素进行单因素模糊评判的平均评判结果, 结果为:

$$\tilde{k}_2 = [(0.200\ 0, 0.062\ 5), (0.750\ 0, 0.075\ 0), (0.975\ 0, 0.075\ 0), (0.975\ 0, 0.062\ 5), (0.750\ 0, 0.075\ 0)]$$

$$\tilde{k}_3 = [(0.200\ 0, 0.062\ 5), (0.800\ 0, 0.075\ 0), (0.975\ 0, 0.062\ 5), (0.800\ 0, 0.087\ 5), (0.750\ 0, 0.062\ 5)]$$

$$\tilde{k}_4 = [(0.300\ 0, 0.075\ 0), (0.750\ 0, 0.087\ 5), (0.800\ 0, 0.062\ 5), (0.800\ 0, 0.075\ 0), (0.750\ 0, 0.087\ 5)]$$

通过式(15)和式(16)计算得到, 当置信水平 λ 为 0.9 时, 新型柴油机空气压缩机的可靠度为:

$$\tilde{R}_c^{(0.9)} = [0.943\ 47, 0.983\ 04]$$

通过专家评判后得到权重系数 $w_1 = 0.7$ 、 $w_2 = 0.3$, 由式(18)得到在置信度 $\lambda = 0.9$ 时, 新机空气压缩机的可靠度为:

$$\tilde{R}_s^{(0.9)} = [0.957\ 9, 0.972\ 1]$$

根据置信水平的概念可知, 当 $\lambda = 1$ 时, $\tilde{R}_s^{(\lambda)}$ 为确定值。

3 结 论

针对传统相似产品预计方法很难得到合理可信的预计结果, 本文引入模糊数的概念, 提出了模糊相似产品预计方法, 提高了预计结果的准确度。由于目前以单一模糊综合评判为基础的可靠性预计方法忽视了相似产品的可靠性数据对新机型的影响, 预计效果也不够理想。为此, 本文综合了模糊相似产品预计方法和模糊综合评判方法, 建立了柴油机的可靠性预计方法, 该方法既考虑了已有机型的可靠性试验数据和维修信息, 又结合了相关专家的实际经验和决策判断, 将确定和不确定信息结合在一起, 对现有的单一模糊综合评判方法进行了补充。

参 考 文 献

- [1] 王远达, 宋笔锋. 系统可靠性预计方法综述[J]. 飞机设计, 2008, 28(1): 37-42.
WANG Yuan-da, SONG Bi-feng. Overview of system reliability prediction method[J]. Aircraft Design, 2008, 28(1): 37-42.
- [2] ORMON S W, CASSADY C R, GREENWOOD A G. Reliability prediction models to support conceptual design [J]. IEEE Transactions on Reliability, 2002, 51(2): 151-157.
- [3] TYOKIN O I, SONKINA T. Parametric reliability-prediction based on small samples[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1997, 46(3): 394-399.
- [4] 赵德孜. 燃气轮机可靠性的模糊预计与优化分配[J]. 燃气轮机技术, 2005, 18(1): 47-51.
ZHAO De-zi. Fuzzy prediction and optimal allocation for gas turbine reliability[J]. Gas Turbine Technology, 2005, 18(1): 47-51.
- [5] 赵德孜, 温卫东, 段成美. 基于模糊数的航空发动机可靠性预计模型[J]. 航空动力学报, 2004, 19(3): 320-325.
ZHAO De-zi, WEN Wei-dong, DUAN Cheng-mei. A model of aeroengine reliability prediction based on fuzzy number[J]. Journal of Aerospace Power, 2004, 19(3): 320-325.
- [6] ZHAO De-zi, WEN Wei-dong, DUAN Cheng-mei. Application of mechanical reliability predication based on fuzzy theory[J]. Trans of Nanjing University of Aeronautics

- & Astronautics, 2004, 21(1): 76-80.
- [7] DENSON W. The history of reliability prediction[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1998, 47(3): 321-328.
- [8] NACHTMANN H, CHIMKA J R. Fuzzy reliability in conceptual design[C]//2003 Proceedings of the Annual Reliability and Maintainability Symposium. [S.l.]: [s.n.], 2003.
- [9] BAZU M. A combined fuzzy-logic & physics-of-failure approach to reliability prediction[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1995, 44(2): 237-242.
- [10] 赵建华, 段友丽, 楚文海. 改进层次分析法和模糊综合评判实现压铸镁合金选材[J]. 铸造技术, 2008, 29(6): 735-738.
ZHAO Jian-hua, DUAN You-li, CHU Wen-hai. Improved analysis hierarchy process and fuzzy synthetic judgment on the selection of die casting magnesium alloys[J]. Foundry Technology, 2008, 29(6): 735-738.
- [11] 云绍辉. 基于AHP的组织学习能力模糊综合评价[J]. 电子科技大学学报(社科版), 2007, 9(5): 26-28.
YUN Shao-hui. Fuzzy synthetic evaluation for organizational learning ability based on AHP[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China (Social Sciences Edition), 2007, 9(5): 26-28.
- [12] 何柱姿, 孙利琼, 杨华昆. 成都市非公有中小企业融资效率模糊综合评价[J]. 电子科技大学学报(社科版), 2008, 10(3): 27-31.
HE Zhu-zi, SUN Li-qiong, YANG Hua-kun. Vague and comprehensive evaluation about financing of non-public ownership small enterprises in Chengdu[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China (Social Sciences Edition), 2008, 10(3): 27-31.

编辑 黄 莘

(上接第573页)

- [8] KOC A, OZAKTAS H M, CANDAN C, et al. Digital computation of linear canonical transforms[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2008, 56(6): 2383-2394.
- [9] HLAWATSCH F, BOUDREAUX-BARTELS G F. Linear and quadratic time-frequency signal representation[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 1992, 9(2): 21-67.
- [10] 张贤达. 现代信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
ZHANG Xian-da. Modern signal processing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.

编辑 黄 莘

(上接第580页)

参 考 文 献

- [1] YU Min. Look into the initial confinement fusion[J]. The China Academy of Engineering Physics, 1980, 1(1): 1-24.
- [2] 胡广月, 刘慎业, 张继彦. 长脉冲KeV X射线源的辐射特征[J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(5): 771-776.
HU Guang-yue, LIU Shen-ye, ZHANG Ji-yan. Emission characteristic of long laser pulse keV X-ray source[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2007, 19(5): 771-776.
- [3] KANIA D, IVERSON A, SMITH L, et al. Flat response detectors—the vacuum ultraviolet and soft X-ray region[J]. Appl Phys, 1986, 60: 2596-2599.
- [4] IDZOREK G, COULTER W, WALSH P. Soft X-ray diagnostics for pulsed power machines[C]//Proc 10th IEEE International Pulsed Power Conference. Los Alamos: National Laboratory, 1995: 981-986.
- [5] KANIA D, LANE S, JONES B, BENNETT C, et al. High speed detection of thermonuclear neutrons with solid state detectors[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1988, 35(1): 387-388.
- [6] 朱健强. 神光II高功率激光实验装置[J]. 自然杂志, 2006, 28(5): 271-273.
ZHU Jian-qiang. Shenguang-II: High power laser facility[J]. Nature Journal, 2006, 28(5): 271-273.
- [7] 江少恩, 郑志坚, 孙科煦. 软X光能谱仪的一种新的解谱方法[J]. 计算物理, 2001, 18(3): 276-280.
JIANG Shao-en, ZHENG Zhi-jian, SUN Ke-xu. A new method unfolding spectral for the soft X-ray spectrometer[J]. Computational Physics, 2001, 18(3): 276-280.
- [8] MIURA E, HONDA H, KATSURA K, et al. Soft X-ray emission from noble gas clusters excited by an ultrashort[J]. Applied Physics B: Lasers and Optics, 2000, 70(60): 783-787.
- [9] 江少恩, 孙科煦, 彭能岭, 等. 小型X光二极管的研制[J]. 核电子学与探测技术, 2004, 24(6): 571-574.
JIANG Shao-en, SUN Ke-xu, Peng Neng ling, et al.. Development on mini X-ray diode[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2004, 24(6): 571-574.
- [10] 郭玉彬. 脉冲等离子体软X射线探测系统[J]. 微细加工技术, 1996, 1(1): 29-39.
GUO Yu-bin. Detecting system of soft X-ray in pulse laser-produced plasma[J]. Microfabrication Technology, 1996, 1(1): 29-39.
- [11] WANG Wen-xiang, YUE Lin-gna, YU Guo-fen, et al. Dispersion equation of the coaxial-radial line[J]. Journal of Electronic Science and Technology of China, 2004, 2(1): 6-9.

编辑 张 俊

