

变电站电气设备分级抗震设防原则研究^①

钟 珉, 程永锋, 代泽兵, 房正刚

(中国电力科学研究院, 北京 100192)

摘要:目前我国对电气设备抗震级别的规定低于国际上其他标准的要求, 并且设防标准的确定考虑设防烈度、场地条件、设计地震分组等多种组合条件, 不利于方便快捷地判断设备的抗震级别。通过对比国内外相关规范中对电气设备抗震设防级别的规定, 分析电气设备进行分级抗震设防的优势, 建议对我国的电气设备进行分级抗震设防。采用典型电气设备抗震可靠度指标作为参数, 对建议的电气设备的抗震设防等级进行划分, 提出高、中、低三等级原则。

关键词: 电气设备; 抗震设防; 设防标准; 等级划分

中图分类号: TM63; TU352.1⁺1

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2015)02-0571-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2015.02.0571

Study on Grading Seismic Fortification Standards of Electrical Equipment at Transformer Substation

ZHONG Min, CHENG Yong-feng, DAI Ze-bing, FANG Zheng-gang

(China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: The seismic fortification levels of electrical equipment have received more and more attention since the Wenchuan earthquake. The current seismic requirement level of electrical equipment in China is lower than that of other international standards, such as IEEE 693, IEC 62271, and JEAG 5003. In China, the seismic level of electrical equipment is decided by combining several conditions of fortification intensity, site condition, and classification of design earthquake, which makes it difficult to determine the seismic level of electrical equipment quickly and conveniently. By comparing domestic and foreign codes about the seismic fortification level of electrical equipment, the advantages of grading fortifications are summarized. Consequently, grading the fortifications for electrical equipment in China was proposed. In order to obtain the principles of this grading, the seismic reliability of electrical equipment was calculated. Design earthquake accelerations exceeding a failure probability of 2% in 50 years, which were higher than the normal value and obtained by survey, were used as calculation parameters. Two typical pillars of electrical equipment were chosen as calculation modals, and the seismic reliability of electrical equipment in ordinary porcelain and high-strength porcelain was calculated using the FOSM method. The use of design earthquake accelerations exceeding a failure probability of 2% in 50 years will meet the seismic target of not collapsing with strong earthquakes, which will further ensure the seismic safety of electrical equipment. The seismic reliability of high-strength porcelain equipment was obviously higher than that of ordinary porcelain equipment. It is an effective method to improve equipment seismic capacity through replacing ordinary porcelain by high-strength porcelain. The reliability

① 收稿日期: 2014-06-30

基金项目: 国家电网公司科技项目 (GC17201100089)

作者简介: 钟珉 (1984), 女, 博士, 工程师, 主要从事电力设施抗震理论研究. E-mail: zhongmin@163.com

results were used as indexes to determine the low, medium, and high levels. Specifically, peak accelerations of 0.1 g and below were considered to be at a low assessment level, and the peak acceleration was taken to be 0.1 g. Values of 0.1~0.4 g corresponded to the medium assessment level, and the peak acceleration was taken to be 0.4 g. Values above 0.4 g comprise the high assessment level, and the peak acceleration was taken to be 0.6 g. By comparing the peak acceleration with those of IEEE and IEC standards, it is found that the proposed seismic fortification for electrical equipment is more reasonable. The acceleration value of each seismic level is slightly lower than the values given by IEEE and IEC.

Key words: electrical equipment; seismic fortification; fortification standard; grade classification

0 引言

电气设备受到地震破坏是震后电网功能失效的主要因素之一。汶川地震中电气设备严重破坏导致的大规模停电使人们意识到对电气设备抗震能力的验证越来越重要。我国电气设备的抗震设计主要依据《电力设施抗震设计规范》(GB 50260-2013)^[1]中的原则和方法进行,其中对于抗震设防级别、场地参数的确定是根据《中国地震动参数区划图》(GB 18306-2001)^[2]和《建筑抗震设计规范》(GB 50011-2010)^[3]等相关标准规定选取的。

《中国地震动参数区划图》(GB 18306-2001)和《建筑抗震设计规范》(GB 50011-2010)是一般建设工程抗震设计的依据,适用于某个特定建筑物的特定设计。其中对于抗震设防要求,既考虑设防烈度的不同对峰值加速度进行了规定,又考虑五类不同场地 I₀、I₁、II、III、IV 和三组设计地震分组的差异对特征周期进行了规定。对于建筑结构来说,由于建筑物的长期性和固定性,这种针对不同烈度不同场地的较细致的划分是可行的。但是电气设备通用性强,如果像建筑结构那样进行细致划分,将不利于其规模化生产,在使用方面也不利于电气工程师的设计选择,甚至会增加设备的抗震鉴定次数,延长调用设备所需要的时间。考虑到电气设备的特点,国外一些国家和地区将地震动区划图进行合并,分成了高、中、低三个等级,给出了适用于电气设备的抗震区划图^[4-5]。

本文对比国内外相关规范对电气设备抗震设防等级的规定,分析电气设备进行分级设防的优势,对电气设备抗震能力的分级设定进行探讨,建议我国电气设备分级抗震设防的原则。

1 国内外电气设备抗震级别的相关规范及标准

世界上多个国家及地区特别针对电气设备设立

了抗震规范,对抗震等级和设防目标进行了规定,如表 1 所示。国外对电气设备抗震设防的规定一般采用设立等级的方式,如日本只设立了一个等级,这与其国土面积狭小、地震类型较为单一有关。而 IEC 规范和美国 IEEE693 规范都设立了高、中、低三个等级,但也有区别。除了各等级的划分标准不一致以外,设防水准的选定也不同,IEC62271-2 的抗震水准对应于 S2 级地震,相当于核电站中的安全停堆地震,年超越概率为 10⁻⁴,IEEE693 则是在 50 年超越概率 2% 的抗震设防水准上进行分级的。

表 1 国外电气设备相关抗震规范抗震等级比较
Table 1 Comparison of seismic levels in foreign related seismic codes for electrical equipments

国外相关标准及规范	抗震等级	PGA/g
美国《变电站抗震设计推荐规程》IEEE Std 693-2005	低等水平: <0.1 g	0.1
	中等水平: 0.1~0.5 g	0.25
	高等水平: >0.5 g	0.5
IEC62271-2:2003《High-voltage switchgear and controlgear-Part 2: Seismic qualification for rated voltages of 72.5kV and above》	AG2: 轻至中强地震	0.2
	AG3: 中强至强地震	0.3
	AG5: 强至强强地震	0.5
日本《电气设备抗震设计指南》 ^[6] JEAG 5003-1998	电瓷型电气设备	0.3
	变压器绝缘套管	0.5

我国电气设备相关抗震规范中对抗震等级的规定如表 2 所示。大部分规范中特别区分了一般设备和重要设备,以 50 年超越概率 10% 为设防水准,以设防烈度为标准进行抗震设防。但也有例外,《高压开关设备和控制设备的抗震要求》(GB/T 13540—2009)借鉴 IEC62271—2:2003,采用了分级设防,并且其抗震水平也与 IEC62271—2:2003 相同,这与我们目前抗震规范很不匹配,也导致我国电气设备抗震级别的规定很不统一。

对比国内外电气设备抗震设防的规定,可以发现,若对电气设备进行分级抗震设防将具有以下几个优势:

表 2 我国电气设备相关抗震规范抗震等级比较^[1,7-8]
Table 2 Comparison of seismic levels in domestic related seismic codes for electrical equipments

国内相关标准及规范		抗震等级	PGA/g
《电力设施抗震设计规范》 GB50260-2013	一般设备	50 年超越概率 10%	-
	重要设备	按设防烈度提高 1 度,但Ⅷ度及以上时不再提高。	-
	一般设备	50 年超越概率 10% 按本地区抗震设防烈度提高 1 度采取抗震措施,但抗震设防烈度为Ⅸ度时,应按比Ⅸ度更高要求采取抗震措施;设计基本加速度提高 0.05 g、0.2 g 及以上不再提高。	-
《工业企业电气设备抗震设计规范》 GB50556-2010	重要设备		-
《高压开关设备和控制设备的抗震要求》 GB/T 13540-2009 (同 IEC62271-2:2003)		AG2:轻至中强地震	0.2
		AG3:中强至强地震	0.3
		AG5:强至强强地震	0.5

(1) 某设备损坏后,可以调用本区域其他变电站的富余设备进行支援,无需再考虑设备的抗震级别;

(2) 将同一区域的电力设施按照同一标准进行设计,较大地简化了设计程序,让工作人员使用更为方便;

(3) 设备厂家可以按照同一标准进行更大规模的生产,有利于节约成本,降低造价;

(4) 同一类型的设备可只进行一次鉴定,避免了多次鉴定的浪费,经济性得到体现;

(5) 在对区划图进行部分合并后,某一地区的备品库可只选择一种类型设备的储存,极大地改善设备调用的时间性。

针对以上分析,考虑目前我国电气设备抗震设防规定方面存在的差异,建议电气设备抗震设防水准采用分级设防的方式,并结合震害调研的基本情况,总结电力设备地震响应特点,从设备的抗震可靠度入手,制定出相应的抗震设防分布图,对今后电网工程建设提供有针对性的设计依据。

2 典型电气设备的抗震可靠度分析

电气设备常常发生脆性破坏,其极限状态方程是线性的,计算其抗震可靠度采用一次二阶矩法足以满足要求。设备的抗力、反应均服从正态分布,则设备抗震可靠指标 β 、失效概率 P_f 和可靠度 P_r 为

$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \tag{1}$$

$$P_f = \phi(-\beta) = 1 - \phi(\beta) \tag{2}$$

$$P_r = \phi(\beta) \tag{3}$$

式中, $\phi(\cdot)$ 为标准正态分布函数; μ_R 和 σ_R 分别为设备抗力 R 的均值和均标准差; σ_R 和 σ_S 分别为反应的均值和均标准差^[9]。根据此方法计算出电气设备在地震作用下薄弱位置的反应均值和方差后,即可算出设备的可靠指标和失效概率。

本文选择两种典型电气设备,利用上述一次二阶矩方法对其在 I₀、I₁、II、III 类场地条件下的抗震可靠度进行分析。

2.1 地震加速度值的选择

对于抗震设防参数的选择,有学者认为对峰值加速度的取值应按地貌分区选择^[10],也有人认为可从以往发生的地震破坏现象中估算极震区地震水平峰值加速度^[11]。

对于电气设备,《电力设施抗震设计规范》(GB50260-96)规定的设防目标可以概括为“中震不坏,大震可修”。此“中震”、“大震”是相对概念,指的是工程场地 50 年超越概率 10% 和 2%~3% 的地震动参数。由于电气设备材料和结构的特点,地震来临时极易发生脆性破坏,很难在实际工程中真正做到“大震可修”。因此,以“大震不坏”的目标进行设计验算将更能保证设备的安全使用性。

我国现行的地震动参数区划图仅给出了 50 年超越概率 10% 的地震动峰值加速度,对 50 年超越概率 2%~3% 的地震动峰值加速度如何取值是抗震设计工作者非常关心的问题。89 规范和有关文件认为,大震平均比中震高 1 度,对峰值加速度而言,大震大体为中震的 2 倍^[12]。01 版地震动参数区划图相关教材认为大震为中震的 1.6~1.7 倍^[13]。也有学者对部分区域进行统计得到大震与中震的相对关系。高孟潭^[14]对 90 区划图的基础数据进行统计发现,中大震之间的烈度差值为 0.3~1.2 度,分布较为离散。陈党民^[15]针对中硬场地,统计得出关中地区大震与中震的地面峰值加速度比值范围为 1.55~1.87,均值为 1.69。沈建文等^[16]给出上海邻近地区 50 年超越概率 2% 的地震动峰值加速度与 50 年超越概率 10% 地震动峰值加速度的比值在 1.7~2.6 之间。滕光亮^[17]通过对甘肃省 158 个场地安全性评价结果分析,讨论了不同的超越概率下水平地震动峰值加速度之间的关系及不同场地对基岩峰值加速度的放大效应。雷建成^[18]得出樊西地区基岩 50 年超越概率 2% 的地震动峰值加速度与 50 年超越概率 10% 地震动峰值加速度的比值为 1.76。

为更好地保证设备的安全性,本文取 50 年超越概率 2% 的地震动峰值加速度,加速度值见表 3。

表 3 不同超越概率下的地震动峰值加速度

Table 3 Peak ground acceleration with different exceedance probabilities

50 年超越概率/%	加速度/g					
	Ⅵ度	Ⅶ度	Ⅷ度	Ⅷ度	Ⅸ度	Ⅸ度
10	0.05	0.1	0.15	0.2	0.3	0.4
2	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6

2.2 瓷材料的基本特性

根据工程经验,对普通瓷试品破坏应力的平均值取 $\bar{X}=26\text{ MPa}$, $\sigma=3.5\text{ MPa}$ 。

高强瓷的基本特性指标根据中国电科院高强瓷电气设备抗侧力试验数据获得,高强瓷破坏应力的平均值取 $\bar{X}=45\text{ MPa}$, $\sigma=6\text{ MPa}$ 。

2.3 避雷器抗震可靠度分析

避雷器选择 500 kV 设备进行分析,由 3 节瓷套组成,每节瓷套内径和外径分别为 125 mm 和 205 mm,总高 4.792 5 m,设备总重 825.72 kg。瓷材料弹模取 90 GPa,底部固结。模型不带支架,计算时取 1.2 倍放大系数,采用反应谱方法计算。基频为 3.18 Hz。

普通瓷条件下避雷器在不同加速度峰值不同场地条件下的可靠度如图 1 所示。同一加速度峰值条件下,除 I 类场地较为坚硬以外,Ⅱ类和Ⅲ类场地所得结果基本一致。加速度为 0.1 g 时避雷器的可靠概率达到 100%;0.2 g 后避雷器的可靠概率水平下降;至 0.4 g 时下降水平较快,由均值 88%下降至 21%。随着加速度继续增加,避雷器的可靠概率均已降至 20% 以下;0.5g 时可靠概率的最低值仅有 6%;0.6 g 时可靠概率最低值只有 3%。

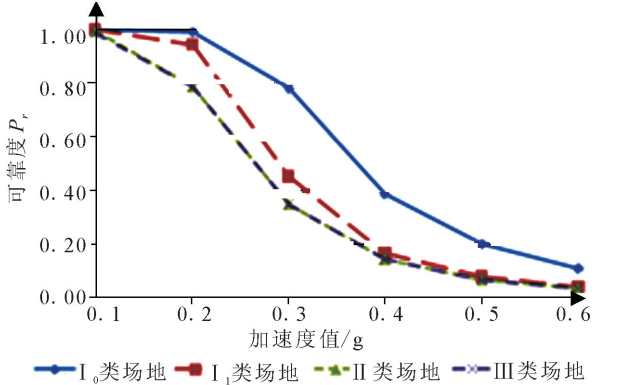


图 1 普通瓷避雷器地震可靠度对比

Fig.1 Seismic reliabilities of ordinary porcelain arresters

高强瓷条件下避雷器在不同加速度峰值不同场地条件下的可靠度如图 2 所示。采用高强瓷后,500 kV 避雷器的抗震可靠概率大幅度提高。以Ⅲ类场

地为例,加速度为 0.3 g 时可靠概率由 34.5%提高至 91.5%;0.4 g 时可靠概率由 13.6%提高至 64.4%;加速度达到 0.6 g 时可靠概率最低也达到 20%以上。说明采用高强瓷材料是提高电网设备抗震安全性的有效手段。

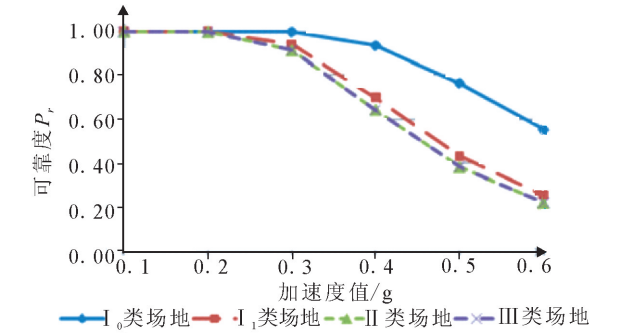


图 2 高强瓷避雷器地震可靠度对比

Fig.2 Seismic reliabilities of high-strength porcelain arresters

2.4 隔离开关抗震可靠度分析

隔离开关选择 220 kV 设备进行分析,设备由 3 组实心瓷柱和 1 个钢管式支架组成。每组瓷柱有两节,上一节半径 0.06 m,下一节半径 0.07 m。设备高度 2.915 m,总重 214.03 kg,支架高 3.50 m。瓷材料弹模取 100 GPa,支架底部固结。基频为 2.45 Hz。

普通瓷条件下隔离开关的抗震可靠度如图 3 所示。加速度为 0.1 g 时可靠概率基本仍能达到 100%,设备完全没有损坏。加速度增大到 0.2 g 时均值已下降至 78.5%,接近 80%。随后当加速度达到 0.3 g 时,可靠概率陡然下降,I_0 类场地下的可靠概率都已降到 40% 以下,均值达到 28.5%。0.4 g 后,可靠概率已降至 20% 以下。

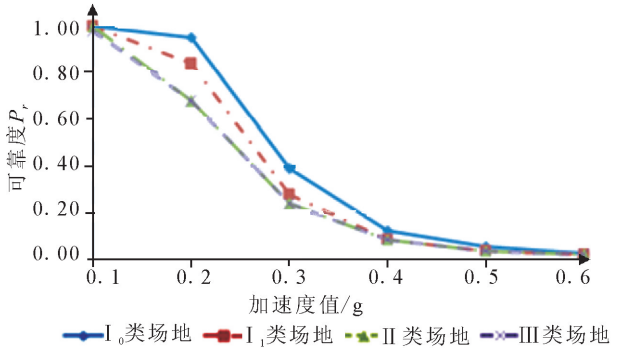


图 3 普通瓷隔离开关地震可靠度对比

Fig.3 Seismic reliabilities of ordinary porcelain disconnectors

高强瓷条件下避雷器的抗震可靠度如图 4 所示。以Ⅲ类场地为例,加速度为 0.4 g 时可靠概率由 7.8%提高至 50.3%;加速度达到 0.6 g 时设备的

可靠概率提高至 13.4%。相比于 500 kV 避雷器, 220 kV 隔离开关的抗震可靠度略小一些。

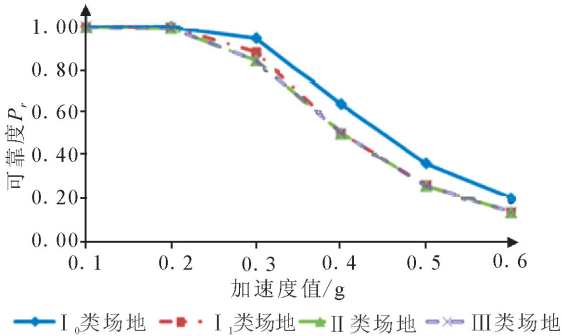


图 4 高强瓷隔离开关地震可靠度对比

Fig.4 Seismic reliabilities of high-strength porcelain disconnectors

综合上述电网设备抗震可靠度计算结果,考虑场地条件、设计地震分组等情况,加速度为 0.1 g 时设备可靠概率为 100%;0.4 g 时在 20%~40%之间,设备处于中等破坏程度;0.6 g 时降至 10%以下,设备处于严重破坏程度。此外,采用高强瓷可提高设备的抗震可靠度,一定程度上保证设备安全。

3 电气设备抗震设防分级的确定

通过基于水平向峰值加速度的汶川地震变电站失效模式统计^[19]可知,当峰值加速度的区间位于 250~300 cm/s² 时,有 53%的变电站停运,其中由设备损坏造成的比例约为 45%;当区间位于 300~400 cm/s² 时,已有 71%的变电站停运,其中由设备损坏而造成的比例约为 67%;当区间位于 400~450 cm/s² 时,停运比例已达到 85%,其中由设备损坏而造成的比例上升为 87%;当峰值加速度达到 500~550 cm/s² 时,停运变电站几乎都是因为设备损坏造成。汶川地震发生地区基本按Ⅶ度设防进行建设,而对应于Ⅶ度、Ⅷ度罕遇地震水平加速度峰值区域,已有 50%甚至 2/3 的变电站停运,因此Ⅶ度、Ⅷ度区的设防水准需要提高。对于Ⅸ度区域的建设工程,其设防水准也需相应提高。

通过对典型电气设备抗震可靠度进行计算分析,将电气设备的抗震能力分为三级:0.1 g 及以下作为第一级低等抗震考核水平,对应于设防烈度Ⅶ度及以下地区,考虑到《电力设施抗震设计规范》(GB50260-96)中规定对于 330 kV 及以上的电气设备在Ⅶ度及以上时应进行抗震设计,对于 220 kV 及以下电气设备在Ⅷ度及以上时应进行抗震设计,加速度峰值取为 0.1 g;0.1~0.4 g 作为第二级中等

抗震考核水平,对应于设防烈度Ⅶ~Ⅷ度地区,加速度峰值取为 0.4 g;0.4 g 以上作为第三级高等抗震考核水平,对应设防烈度Ⅸ度以上地区,加速度峰值取为 0.6 g。

将建议的电气设备抗震设防标准、IEEE693 及 IEC62271-2 对应于各烈度区的极限峰值加速度进行比较,如表 4 所示。表中未给出日本《电气设备抗震设计指南》(JEAG 5003-1998),原因在于日本规范采用的设计地震力形式为正弦共振三波,转换为对应反应谱的峰值加速度要大于我国规范、IEEE 及 IEC 规范。

表 4 极限峰值加速度的比较

Table 4 Comparison of limit peak acceleration

	加速度/g		
	电气设备 抗震设防	IEEE Std 693—2005	IEC 62271-2
Ⅵ度(0.05 g)	0.1	0.20	0.40
Ⅶ度(0.10 g)	0.4	0.50	0.40
Ⅶ度(0.15 g)	0.4	0.50	0.40
Ⅷ度(0.20 g)	0.4	0.50	0.60
Ⅷ度(0.30 g)	0.6	0.50	0.60
Ⅸ度(0.40 g)	0.6	1.00	0.60

由表 4 可知,建议的电气设备抗震设防标准与 IEEE 及 IEC 比较,整体分区较为合理,各抗震等级加速度取值适中,基本略低于 IEEE 和 IEC 的加速度取值。

4 结论

目前我国采用的变电站电气设备抗震设防区划根据《中国地震动参数区划图》(GB18306—2001)的要求制定,但该规范主要是供建筑抗震设计使用的,而建筑结构与电气设备在材料、结构形式及生产方式上都有很大的不同,因此针对建筑的较为细致的划分并不利于电气设备的规模化、批量化生产。

对典型高压电气设备进行不同场地条件下的抗震可靠度分析,发现可将我国高压电气设备的设防等级划分为高、中、低三类:0.1 g 以下为低等抗震考核水平,加速度可定位 0.1 g;0.1~0.4 g 为中等抗震考核水平,加速度峰值可定为 0.4 g;大于 0.4 g 为高等抗震考核水平,加速度峰值可定为 0.6 g。

将建议的电气设备抗震设防级别与国内外目前现有规范的抗震考核水平比较,建议的抗震考核水平比现有国内规范规定的水平高,略低于国外电气设备抗震考核水平。

参考文献(References)

- [1] GB50260-2013. 电力设施抗震设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.
GB 50260-2013. Code for Seismic Design of Electrical Installations[S]. Beijing: China Planning Press, 2013. (in Chinese)
- [2] GB18306-2001. 中国地震动参数区划图[S]. 北京: 中国标准出版社, 2001.
GB 18306-2001. Seismic Ground Motion Parameter Zonation Map of China[S]. Beijing: Standards Press of China, 2001. (in Chinese)
- [3] GB 50011-2010. 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
GB 50011-2010. Code for Seismic Design of Buildings[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)
- [4] IEEE Std 693-2005. IEEE Recommended Practice for Seismic Design of Substations[S]. IEEE Power Engineering Society, 2005.
- [5] IEC. High-voltage Switchgear and Controlgear, Part 2: Seismic Qualification for Rated Voltages of 72.5 kV and Above (IEC 62271-2)[S]. 2003.
- [6] JEAG 5003-1998. 电气设备抗震设计指南[S]. 日本电气技术标准调查委员会, 1998.
JEAG 5003-1998. Guide for Seismic Design of Electrical Equipment[S]. Japan Electrical Technical Standard Committee, 1998. (in Japanese)
- [7] GB50556-2010. 工业企业电气设备抗震设计规范[S]. 北京: 人民出版社, 2010.
GB 50556-2010. Code for Aseismic Design of Electrical Facilities in Industrial Plants[S]. Beijing: People's Publishing House, 2010.
- [8] GB/T 13540-2009. 高压开关设备和控制设备的抗震要求[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
GB/T 13540-2009. Seismic Qualification for High-voltage Switchgear and Controlgear[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010.
- [9] 陈淮, 李杰. 高压电气设备抗震可靠性分析方法[J]. 世界地震工程, 2006, 16(2): 19-23.
CHEN Huai, LI Jie. Seismic Reliability Analysis of High Voltage Electrical Equipments[J]. World Information on Earthquake Engineering, 2006, 16(2): 19-23. (in Chinese)
- [10] 王爱国, 赵泽贤. 陇东黄土高原地区建筑抗震设防参数研究[J]. 西北地震学报, 2012, 34(1): 78-83.
WANG Ai-guo, ZHAO Ze-xian. Study on the Seismic Fortification Parameters in the Losses Plateau of Eastern Gansu Province[J]. Northwestern Seismological Journal, 2012, 34(1): 78-83. (in Chinese)
- [11] 王爱国, 刘方斌. 岷县漳县 6.6 级地震极震区峰值加速度估算[J]. 地震工程学报, 2013, 35(3): 483-488.
WANG Ai-guo, LIU Fang-bin. Estimation of Peak Ground Acceleration in Magistoseismic Area of the Minxian—Zhangxian $M_s 6.6$ Earthquake[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(3): 483-488. (in Chinese)
- [12] 中国建筑科学研究院. 建筑抗震设计规范条文说明[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1990: 1-2.
China Academy of Building Research. Specification for Code for Seismic Design of Buildings[M]. Shenyang: Liaoning Science and Technology Publishing House, 1990: 1-2. (in Chinese)
- [13] 国家标准化管理委员会. 中国地震动参数区划图(GB18306-2001)宣贯教材[M]. 北京: 中国标准出版社, 2001: 106.
Standardization Administration of the People's Republic of China. Teaching Material of Seismic Ground Motion Parameter Zonation Map of China[M]. Beijing: Standards Press of China, 2001: 106.
- [14] 高孟潭, 韩炜. 抗震设计中大、中、小地震的确定[C]//地震工程研究文集北京: 地震出版社, 1992: 22-27.
GAO Meng-tan, HAN Wei. Determination of Large, Medium and Small Earthquakes in Seismic Design[C]//Research on Earthquake Engineering. Beijing: Seismological Press, 1992: 22-27.
- [15] 陈党民. 陕西关中地区不同超越概率水平下地震动峰值加速度关系研究[J]. 地震工程与工程振动, 2012, 32(3): 34-40.
CHEN Dang-min. Study on Relationship Between Ground-Motion Peak Accelerations and Different Levels of Exceeding Probability in Guanzhong Area of Shaanxi Province[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2012, 32(3): 34-40. (in Chinese)
- [16] 沈建文, 石树中. 大中小震与抗震设防标准[J]. 地震学报, 2004, 26(5): 533-538.
SHEN Jian-wen, SHI Shu-zhong. Large, Middle, Small Earthquake and Seismic Fortification Criterion[J]. ACTA Seismologica Sinica, 2004, 26(5): 533-538. (in Chinese)
- [17] 滕光亮, 陈永明. 甘肃地区三水准超越概率水平地震动峰值加速度关系与场地放大效应研究[J]. 西北地震学报, 2011, 33(S): 443-445.
TENG Guang-liang, CHEN Yong-ming. Study on the Relationship among Ground Motion Peak Accelerations in Three Level Exceedance Probability and Site Amplification Effect in Gansu Area[J]. Northwestern Seismological Journal, 2011, 33(S): 443-445. (in Chinese)
- [18] 雷建成. 攀西地区不同风险水平下基岩地震动参数之间的关系[J]. 中国地震, 2002, 18(2): 193-202.
LEI Jian-cheng. The Relationship of Bedrock Seismic Ground Motion Parameters with Different Exceedance Probabilities in Panxi Area[J]. Earthquake Research in China, 2002, 18(2): 193-202. (in Chinese)
- [19] 杨长青. 基于地震动参数高压电气设备的易损性分析[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2011.
YANG Chang-qing. Vulnerability Analysis of High-voltage Electrical Equipment Based on Ground Motion Parameter [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2011.