

某 500 kV 紧凑型线路的带电作业可行性研究

李超¹, 胡毅², 李景禄¹, 王力农², 刘凯², 邵瑰玮², 郑传广², 陶蓉¹

(1. 长沙理工大学, 湖南 长沙 410076; 2. 国网武汉高压研究院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 500 kV 紧凑型线路带电作业的难点是确定最小安全距离。为了解决这个问题, 对 GB/T 19185-2003 《交流线路带电作业安全距离计算方法》进行了研究, 同时根据某具体线路的实际情况, 通过计算和试验相结合的方式, 用实际带电作业危险率来判断带电作业安全性, 由危险率小于 1×10^{-5} 的要求得出带电作业最小安全距离, 校核出该 500 kV 紧凑型线路直线塔最小相地距离和相间距离分别为 2.6 m 和 4.5 m, 转角塔和终端塔最小相地距离和相间距离分别为 2.7 m 和 4.5 m, 最后根据该线路塔型的实际尺寸对带电作业进行了安全可行性校核。研究表明在该线路中带电作业安全可行。

关键词: 紧凑型; 带电作业; 安全距离; 危险率

中图分类号: TM84

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2008)02-0160-05

Feasibility Research of Live Working on 500 kV Compact Line

LI Chao¹, HU Yi², LI Jing-lu¹, WANG Li-nong², LIU Kai², SHAO Gui-wei², ZHENG Chuan-guang², TAO Rong¹

(1. Changsha University of Science & Technology, Changsha 410076 China;

2. Wuhan High Voltage Research Institute Of SGCC, Wuhan 430074, China)

Abstract: The major problem of live working on 500 kV compact line is to determine the minimum approach distance. To solve the problem, this paper analyzed GB/T 19185-2003 "The Computational Method on the Approach Distance of AC Circuit Living Work", judged the reliability of live working with dangerous rate of real live working through calculation and experiment based on a real case. According to the requirement that dangerous rate should be less than 1×10^{-5} , the approach distance can be calculated, hence the minimum phase-ground distance and phase spacing of the linear tower of 500 kV compact line are respectively achieved as 2.6 m and 4.5 m, and the minimum phase-ground distance and phase spacing of the angle tower and terminal tower as respective 2.7 m and 4.5 m. Finally the security and feasibility of live working was checked based on the real size of the line tower. The research illustrates that live working is safe and feasible on this line.

Key words: compact; live working; approach distance; dangerous rate

0 引言

随着我国电网的不断发展, 500 kV 紧凑型线路的应用也逐渐广泛。紧凑型塔型结构和导线布置大大压缩了相间距离和塔头尺寸, 使结构布置紧凑化, 较常规型线路输送容量大、工程造价低、防雷性能好^[1-3]。但是这些特点也给输电线路的带电作业带来了新的问题。文[4]规定了 500 kV 地电位带电作业时人身与带电体的安全距离不得小于 3.6 m, 等电位带电作业时人身对邻相导线的距离不得小于 5.0 m。500 kV 紧凑型线路通常无法满足这个要求, 故应根据线路实际情况, 通过计算和试验相结合的方式校

核紧凑型线路带电作业安全性, 用实际带电作业危险率来判断带电作业是否安全。为了可靠运行及维护检修, 紧凑型线路需要研究合适的带电作业安全距离^[5-10]。

1 线路操作过电压

确定带电作业安全距离时要考虑的最大过电压不应该是合空线过电压或单相重合闸过电压^[3], 因为带电作业时不可能进行合空线操作, 根据文[11]的规定, 带电作业时单相自动重合闸停用。所需考虑的是接地故障发生和消除时的过电压, 它是人们无法完全控制和预防的。主要故障为带电作业线路或邻近线路单相接地跳三相, 两相接地跳三相和三相接地跳三相。但一般不考虑后两项故障, 因为一般在沿线路

收稿日期: 2007-08-27; 修回日期: 2007-12-29

作者简介: 李超(1981-), 男, 硕士研究生, 研究方向为高电压与绝缘技术。

地区天气不好,可能发生大风导致两相短路;覆冰倒塔导致三相短路等情况下,不会进行带电作业。所以它们发生的时间正好与带电作业时间重合的概率比单相接地小得多。

该 500 kV 紧凑型线路有 CZ₁ 型直线塔、CJ₁ 型转角塔和 DJ₁ 型终端塔三种塔型,塔型图见图 1。使用 EMTP 仿真软件(ATP 版)对该线路的操作过电压进行仿真分析。这里最大操作过电压是指线路 0.13%过电压,是根据线路过电压分布为正态分布后计算得到的 0.13%过电压。

2007 年夏天大运行方式下,线路两端和中点单相接地跳三相的计算结果见表 1。沿线最大的相一地过电压为 1.68 p.u.(754 kV)。沿线最大相间过电

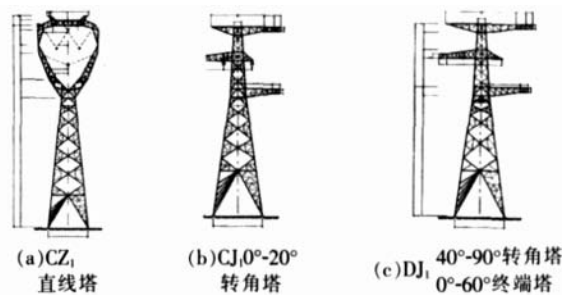


图 1 某 500 kV 紧凑型线路三种塔型单线图

压为 2.86 p.u.(1 284 kV)。

2007 年冬天小运行方式下,线路两端和中点单相接地跳三相的计算结果见表 2。沿线最大的相一地过电压为 1.68 p.u.(754 kV)。沿线最大相间过电压为 2.65 p.u.(1 190 kV)。

表 1 2007 年夏天大运行方式,单相接地故障两侧跳三相,健全相过电压(1.0 p.u.=550/√3)

运行方式	接地故障相和接地点	健全相相地最大过电压/p.u.			健全相相间最大过电压/p.u.			MOA 能量/MJ		
		首端	末端	沿线最大	首端	末端	沿线最大	首端	末端	
2007 年夏大	A 侧	A 相	1.58	1.68	1.68	2.51	2.51	2.51	0.03	0.05
		B 相	1.61	1.68	1.68	2.55	2.55	2.55	/	0.05
		C 相	1.62	1.67	1.67	2.64	2.64	2.64	0.04	0.06
	B 侧	A 相	1.58	1.67	1.67	2.42	2.43	2.43	0.03	0.05
		B 相	1.56	1.67	1.67	2.50	2.50	2.50	/	0.04
		C 相	1.61	1.68	1.68	2.48	2.48	2.48	0.05	0.05
线路中点	A 相	1.60	1.67	1.67	2.81	2.81	2.81	0.02	0.03	
	B 相	1.65	1.67	1.67	2.86	2.86	2.86	0.33	0.41	
	C 相	1.65	1.68	1.68	2.83	2.83	2.83	0.47	0.47	
最大值		1.65	1.68	1.68	2.86	2.86	2.86	0.47	0.47	

注:线路首端先分闸,末端后分闸。A、B、C 相分别指在 A、B、C 相发生故障接地。

表 2 2007 年冬天小运行方式,单相接地故障两侧跳三相,健全相过电压(1.0 p.u.=550/√3)

运行方式	接地故障相和接地点	健全相相地最大过电压/p.u.			健全相相间最大过电压/p.u.			MOA 能量/MJ		
		首端	末端	沿线最大	首端	末端	沿线最大	首端	末端	
2007 年冬小	A 侧	A 相	1.59	1.66	1.66	2.51	2.52	2.52	0.03	0.04
		B 相	1.59	1.65	1.65	2.62	2.62	2.62	/	0.04
		C 相	1.62	1.68	1.68	2.65	2.65	2.65	0.05	0.05
	B 侧	A 相	1.62	1.67	1.67	2.42	2.42	2.42	0.02	0.05
		B 相	1.55	1.67	1.67	2.47	2.47	2.47	/	0.04
		C 相	1.58	1.68	1.68	2.53	2.53	2.53	0.02	0.06
线路中点	A 相	1.56	1.66	1.66	2.40	2.40	2.40	0.02	0.04	
	B 相	1.57	1.65	1.65	2.57	2.57	2.57	/	0.02	
	C 相	1.60	1.66	1.66	2.63	2.63	2.63	0.02	0.04	
最大值		1.62	1.68	2.68	2.65	2.65	2.65	0.05	0.05	

注:线路首端先分闸,末端后分闸。A、B、C 相分别指在 A、B、C 相发生故障接地。

由于 2007 年夏天大运行方式下的过电压倍数大于冬天小运行方式下的过电压倍数,计算最大操作过电压倍数时按 2007 年夏天大方式考虑。该线路带电作业时相地最大操作过电压为 1.68 p.u.,相间最大操作过电压为 2.86 p.u.。

2 操作冲击试验

操作冲击试验是在武汉高压研究院特高压户外

试验场进行的。所用的模拟塔是根据提供的 CZ₁ 直线塔型图纸按 1:1 比例制作的。对于 CJ₁ 转角塔和 DJ₁ 终端塔这两种塔型,进行带电作业时是沿耐张绝缘子串和跳线进入等电位,所以对 CJ₁ 型转角塔和 DJ₁ 型终端塔这两种塔型的操作冲击放电试验,是模拟进入耐张绝缘子串进行的。

对线路波头时间进行统计分析,结果表明该线路操作过电压最小波头时间均在 2 000 μs 以上。在

进行带电作业空气间隙试验时采用波头为 250 μs 的标准操作冲击波,并留有额外的安全裕度^[6]。

(1) CZ₁ 直线塔

将模拟人全身套上屏蔽服置于模拟塔中的典型位置,进行操作冲击放电试验得出放电电压。该 500 kV 紧凑型线路带电作业时模拟各种作业工况的典型位置示意图见图 2。图 2 中 1 点为模拟人蹲坐于上相导线;2 点为模拟人坐在吊椅上由塔身横移进入等电位,人接触导线;3 点为模拟人直立在塔身手持绝缘操作杆对带电导线进行作业;4 点为模拟人直立于下相导线上部子导线上。具体试验数据见表 3^[12]。

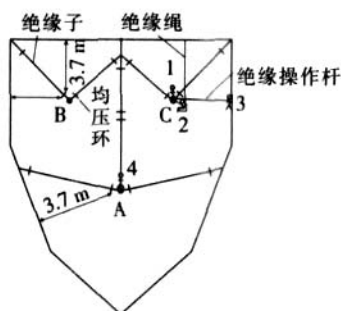


图 2 各种作业工况的典型位置示意图

表 3 标准气象条件下 CZ₁ 型塔典型位置的操作冲击击穿电压 U/kV

距离/m	放电电压/kV			
	位置 1	位置 2	位置 3	位置 4
2.6	1 064	-	1 109	-
2.8	-	1 243	1 159	-
2.9	1 136	-	-	-
3.0	-	1 295	1 209	-
3.2	1 216	1 348	1 258	-
3.4	-	1 398	-	-
3.5	1 293	-	-	-
3.7	-	-	-	1 479
4.0	-	-	-	1 551
4.3	-	-	-	1 619
4.6	-	-	-	1 686

(2) CJ₁ 转角塔和 DJ₁ 终端塔

对于 CJ₁ 转角塔和 DJ₁ 终端塔这两种塔型,是沿耐张绝缘子串和跳线进入等电位的。所以,在 CJ₁ 型转角塔和 DJ₁ 型终端塔这两种塔型上进行带电作业时,是按照进入耐张绝缘子串的方式来确定最小安全距离的。

耐张串等电位作业位置时,模拟人身穿屏蔽服,以“跨二短三”方式俯姿蹲在耐张串与导线均压环联结处,模拟人两肩宽度为 0.5m。改变杆塔构架至模拟人之间的距离,通过试验求取 U₅₀ 和 Z,试验结果见表 4。

表 4 耐张绝缘子串安全距离试验结果

总绝缘子片数	模拟人占位	塔腿至模拟人距离/m	U ₅₀ /kV	Z/(%)
16		2.02	879	4.2
19		2.42	992	4.1
22	3 片	2.96	1 117	4.7
25		3.41	1 204	3.1
28		3.88	1 285	3.6

3 间隙系数和海拔修正系数

间隙系数是研究间隙放电特性的重要参数。电极的形状和尺寸对间隙的电气强度有明显的影响,在正极性操作冲击电压下,棒-板结构的放电电压最低,其间隙系数为 1.0。对于其他不同的电极结构,可用不同间隙系数来表征其对电气强度的影响。一般采用间隙系数来计算常规架空线路间隙结构的带电作业最小安全距离^[13, 14]。

结合该线路的模拟试验数据,得出不同作业位置电极结构的间隙系数 K: 位置 1 的间隙系数为 1.20, 位置 2 的间隙系数为 1.34, 位置 3 的间隙系数 K 为 1.25, 位置 4 的间隙系数为 1.35。考虑安全裕度, CZ₁ 型直线塔上带电作业时相地最小安全距离按公式 U₅₀=600d^{0.6}(K=1.20) 计算,相间最小安全距离按公式 U₅₀=675d^{0.6}(K=1.35) 计算。

当线路经过高海拔地区时,还要对放电电压值进行海拔高度修正^[12]。具体的修正办法是把试验所得的放电电压值乘以一个修正系数。文[15]给出了不同海拔高度和电压值的海拔修正系数值。该 500 kV 紧凑型线路所经过的是平原地区,海拔高度均不超过 100 m,因此不必进行海拔高度的修正。

4 危险率计算及校核

目前,国内进行带电作业绝缘配合研究及安全性校核时,通常用国际电工委员会推荐的统计法。其基本指导思想是:根据操作过电压和绝缘放电电压的统计分布规律,将绝缘受到一次操作过电压时发生放电的概率(即带电作业危险率 R₀)限制到规定的水平即 R₀<1.0×10⁻⁵。R₀可由式(1)得到^[5, 6, 13]

$$R_0 = \frac{1}{2} \int_0^\infty P_0(U) \cdot P_d(U) du \quad (1)$$

式(1)中, P₀(U) 为操作过电压幅值的概率密度函数; P_d(U) 为空气间隙在幅值为 U 的操作过电压下击穿的概率分布函数。分别为

$$P_0(U) = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot e^{-\frac{1}{2}(\frac{U-U_0}{U_0})^2} \quad (2)$$

$$P_d(U) = \int_0^U \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot e^{-\frac{1}{2}(\frac{U-U_m}{Z})^2} du \quad (3)$$

式(2)、(3)中: U_m 为操作过电压平均值; σ 为操作过电压的标准偏差; U_{50} 为空气间隙 50%放电电压; Z 为空气间隙放电电压的标准偏差。其中 $U_m = U_{0.13\%} / (1+3[\sigma])$, 而 $U_{0.13\%}$ 为最大过电压; $[\sigma] = \sigma / U_m$ 为过电压的相对标准偏差。从以上计算模型可见, 决定带电作业间隙危险率水平的主要因素是线路操作过电压水平和间隙的 50%操作冲击放电电压值。

基于该 500 kV 紧凑型线路带电作业时最大操作过电压的研究, 结合各种典型作业位置和进入等电位路径的操作冲击放电试验结果, 计算该线路带电作业时各典型位置的危险率。根据系统过电压及带电作业时操作过电压的计算研究结果, 用 C 语言编制程序计算危险率公式。在计算中, 接地故障和故障清除时相地最大操作过电压取 1.68 p.u., 相间最大操作过电压取 2.86 p.u., 过电压相对标准偏差取 12%, 放电电压变异系数 Z 统一取 6%。取各典型位置的危险率为 1×10^{-5} 时的间隙距离为最小安全距离, 比较各个典型位置的最小安全距离值, 取最小值为该线路带电作业时的最小安全距离。对各种可接受的最小间隙距离适当取整后得到的最小间隙距离及对应的 U_{50} 和危险率示于表 5、6。

表 5 某 500 kV 紧凑型线路 CZ₁ 直线塔带电作业最小间隙距离

类型	最大过电压/p.u.	U_{50} /kV	最小间隙距离/m	危险率/ $(\times 10^{-6})$	最小安全距离/m
相-地	1.68	936	2.1	5.8	2.6
相-相	2.86	1551	4.0	8.8	4.5

表 6 耐张绝缘子串最小安全距离

最大过电压/p.u.	U_{50} /kV	最小间隙距离/m	危险率/ $(\times 10^{-6})$	最小安全距离/m
1.68	932	2.2	3.6	2.7

由以上分析可得, CZ₁ 型直线塔带电作业相地最小间隙距离为 2.1 m, 相间最小间隙距离为 4.0 m; 考虑人体的 0.5 m 占位后, 相地最小安全距离为 2.6 m, 相间最小间隙距离为 4.5 m。

由以上分析可得, CJ₁ 型和 DJ₁ 型杆塔带电作业的最小间隙距离为 2.2 m, 考虑人体的 0.5 m 占位后, 最小安全距离为 2.7 m。

在确定了最小安全距离后, 根据该线路 CZ₁ 型直线塔的实际尺寸再对带电作业时作业人员各种作业工况的位置进行模拟试验, 示意图见图 3。

进入等电位路径内各典型位置为: 5 点为模拟

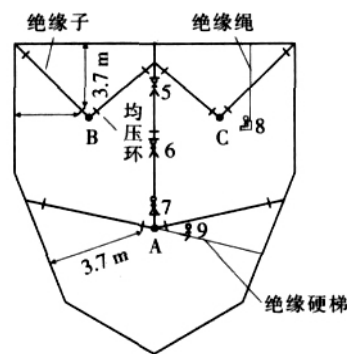


图 3 从 CZ₁ 型塔上进入等电位路径示意图

人头部与中直串上端的均压环接触, 人体处于地电位, 脚距离两上相均压环 3.2 m; 6 点为模拟人头部与中直串中部的均压环下端接触, 人体位于塔窗轴线上; 7 点为模拟人脚踩在中直串下端的均压环上, 人体与下相等电位, 人体位置正对中直串, 头顶距上相导线 4 m; 8 点为模拟人坐在吊椅上由塔身横移进入等电位, 人距高电位 0.4 m, 背部距离塔身 2.8 m; 9 点为模拟人由塔身爬硬梯斜向进入等电位, 人距高电位 0.4 m, 背部距离塔身 2.8 m, 脚距离塔身 3.0 m。

进行校核试验时, 50%击穿电压值及标准偏差均已按校正公式修正到标准大气状况下。根据安全距离试验研究中的结果, 试验中对 5、6、7 点考虑邻近相反极性操作波的影响, 对 8、9 点不考虑反极性操作波的影响。试验采用的操作冲击电压波形为 250/2 500 μ s。进入等电位路径内各典型位置的操作冲击击穿电压值和危险率计算见表 7。

表 7 各典型位置操作冲击击穿电压 U_{50}

作业位置	加压方式	标准气象条件下 U_{50} /kV	危险率
5	C+B-A 地	1 180	5.17×10^{-7}
6	A+B-C 地	1 713	4.96×10^{-15}
7	A+B-C 地	1 605	4.84×10^{-13}
8	C+A 地 B 地	1 265	8.34×10^{-10}
9	A+B 地 C 地	1 215	7.48×10^{-8}

根据计算及安全距离试验研究的结果, 可以确定该 500 kV 紧凑型线路, 采用常规作业方式进行等电位和地电位带电作业都是安全的。

在进行带电作业安全距离研究时, 必须考虑具体的线路过电压水平与概率分布以及线路的塔型结构, 导线布置等。而文[4, 11]中规定的过电压水平和安全距离是根据最严苛条件下制定的, 具体使用中可能由于安全裕度过大而造成不必要的成本上升, 因此带电作业要以某条具体的线路为例, 其研究方法和计算方法具有通用性。通过对该线路带电作业可行性的研究, 可为其它线路的研究提供参考^[14]。

5 结论

(1) 根据文[15], 用计算和试验相结合的方式证

实某 500 kV 紧凑型线路上的带电作业安全可行。

(2) 该线路带电作业时 CZ₁ 型直线塔带电作业的相地最小间隙距离为 2.1 m, 相间最小间隙距离为 4.0 m; 考虑人体的 0.5 m 占位后, 相地最小安全距离为 2.6 m, 相间最小安全距离为 4.5 m。

(3) 该线路带电作业时 CJ₁ 型和 DJ₁ 型杆塔带电作业的相地最小间隙距离为 2.2 m, 相间最小间隙距离为 4.0 m; 考虑人体的 0.5 m 占位后, 相地最小安全距离为 2.7 m, 相间最小安全距离为 4.5 m。

(4) 校核紧凑型线路带电作业安全性时应根据线路实际情况, 通过计算和试验相结合的方式用带电作业危险率来判断带电作业是否安全。

(5) 笔者进行的某线路带电作业可行性的研究为其它线路的研究提供了参考方法。

参考文献:

[1] 戴适铭. 论紧凑型线路技术的发展及在三峡工程中的应用[J]. 高电压技术, 1996, 22(1): 47-49.

[2] 马为民, 陈维贤. 500 kV 高自然功率紧凑型线路的功率特性[J]. 高电压技术, 1994, 20(4): 11-14.

[3] 胡毅, 聂定珍, 王力农. 500 kV 同塔双回紧凑型线路的带

电作业安全距离[J]. 高电压技术, 2003, 29(8): 3-5.

[4] DL 409-1991. 电业安全工作规程(电力线路部分)[S].

[5] 胡毅, 翁旭. 三峡 500 kV 同塔双回线路带电作业试验研究[J]. 高电压技术, 2001, 27(1): 57-58.

[6] 王力农, 胡毅, 刘凯, 等. 500 kV 高海拔紧凑型线路带电作业研究[J]. 高电压技术, 2005, 31(8): 12-14.

[7] 胡毅, 聂定珍, 王力农. 500 kV 紧凑型双回线路的安全作业方式研究[J]. 高电压技术, 2001, 27(12): 31-33.

[8] 郝旭东, 龚延兴. 500 kV 紧凑型输电线路带电作业研究[J]. 电力设备, 2005, 6(2): 29-32.

[9] 丁一正, 张文汉. 第二代 500 kV 交流线路带电作业安全间距的试验研究[J]. 东北电力技术, 1995(7): 6-11, 14.

[10] 赵联英. 500 kV 托源线和源安线带电作业安全距离的探讨[J]. 科技情报开发与经济, 2006, 16(7): 157-158.

[11] DL 408-1991. 电业安全工作规程(发电厂和变电所电气部分)[S].

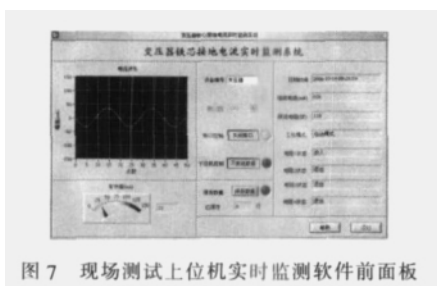
[12] DLT 620-1997. 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合[S].

[13] 丁一正, 谈克雄. 带电作业技术基础[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.

[14] 胡毅. 送变电带电作业技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.

[15] GB/T 19185-2003. 交流线路带电作业安全距离计算方法[S].

(上接第 159 页)



6 结语

笔者选择了变压器铁心接地线中的电流大小作为判断铁心是否出现多点接地的依据具有可行性, 装置可实时监测铁心地线电流, 当出线电流异常时能自动地投切电阻将电流限制在合理的范围之内, 并具有报警、数据的保存和分析功能。虽然该装置不能彻底消除铁心多点接地故障, 但能及时发现多点接地故障并报警, 并临时自动串联电阻, 从而避免了事故的进一步恶化。该装置的研究成功对提高变压器铁心运行的安全性起了较好的推动作用。

参考文献:

[1] 陈敢峰. 变压器检修[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.

[2] 闫永明. 变压器铁心多点接地故障的检测与处理[J]. 山西电力技术, 2001(2): 47-48.

[3] 黎炜. 主变铁心多点接地故障分析及处理[J]. 电力安全技术, 2003, 5(3): 7-8.

[4] 耿江海, 律方成, 刘云鹏, 等. 变压器铁心接地电流理论分析[C]// 南京: 中国电力高等学校电力系统及其自动化专业第 22 届年会, 2006: 215-219.

[5] 刘传彝. 电力变压器设计计算方法与实践[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2002.

[6] 沈阳变压器研究所. 变压器铁心制造[M]. 北京: 机械工业出版社, 1983.

[7] DL/T 572-1995. 电力变压器运行规程[S].

[8] 刘和平, 严利平, 张学峰, 等. TMS320LF240x DSP 结构、原理及应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2002.

[9] 杨乐平, 李海涛. LabVIEW 高级程序设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.

[10] 刘云鹏, 丁玉剑, 律方成, 等. 变压器有载分接开关检测系统的设计[J]. 高压电器, 2007, 43(1), 25-28.