

## Investigation on the Distribution of Electric Field in the Insulation of DC Cable

Zhu Zhien\* Yang Liming Li Dong Gao Kai

Zeng Hao Chen Longxiao Ma Yili Wang Chuanbo Jiang Zhenxing

NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing

**Abstract:** The theory of the distribution of electric field in the insulation of DC cable is investigated based on Gauss law, and the expression of the electric field is acquired in this paper. The distribution of electric field is investigated for the real  $\pm 200$  kV and  $\pm 320$  kV DC cables based on the distribution theory. The influence of resistivity on the electric field in insulation of DC cable is analyzed, and the relationship between DC electric field and AC electric field of the cable insulation is studied. It indicated that the position of the maximum field is changed from the outer insulation to the inner insulation, and the distribution of DC field and AC field tends to be consistent with the increasing of resistivity.

**Key words:** Gauss law; DC cable; Distribution of electric field; Resistivity

Received: 2020-06-18; Accepted: 2020-06-29; Published: 2020-08-17

# 直流电缆绝缘电场分布研究

朱智恩\* 杨黎明 李 栋 高 凯 曾 浩 陈龙啸 马一力  
王传博 江贞星

南瑞集团有限公司（国网电力科学研究院有限公司），南京

邮箱: zhuzhien@sgepri.sgcc.com.cn

**摘 要:** 本文以高斯定理为基础, 研究了全新的直流电缆绝缘电场分布理论, 提出了表达关系式。基于分布理论, 研究了实际的直流电缆绝缘中的电场分布。分析了电阻率对直流电缆绝缘电场分布的影响, 并探索了电缆绝缘的交、直流电场分布联系。结果表明, 随着电阻率增加, 直流电缆绝缘最大电场位置由内变外, 并且电缆绝缘的直流电场分布与交流电缆分布趋于一致。

**关键词:** 高斯定理; 直流电缆; 电场分布; 电阻率

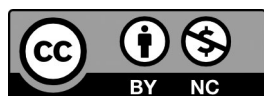
收稿日期: 2020-06-18; 录用日期: 2020-06-29; 发表日期: 2020-08-17

---

Copyright © 2020 by author(s) and SciScan Publishing Limited

This article is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



## 1 引言

高压柔性直流输电技术在电力系统近年来获得快速发展。其主要应用于远距离大容量输电、电力系统联网、远距离海底电缆或大城市地下电缆送电、配电网的直流输电等方面 [1]。目前,国内已成功投运  $\pm 200$  kV 和  $\pm 320$  kV 柔性直流输电工程,正在准备投运  $\pm 500$  kV 柔直输电工程。

作为柔直输电系统的重要组成部分,柔直电缆的研究在国内已得到重视并逐步开展,但还有较多问题需要研究。近年来,国内学者主要针对直流电缆的空间电荷问题进行了较多的研究,有学者发现添加纳米添加剂能够显著抑制绝缘中的空间电荷注入 [2] [3] [4] [5],也有学者测试了直流电缆绝缘中的空间电荷,并发现随着加压时间的延长,空间电荷积聚更显著 [6]。但较少关注直流电缆绝缘中的电场分布。

经过多年的研究,交流电缆绝缘电场分布理论已趋成熟,而直流电缆绝缘的电场分布理论还未完善。在交流电缆绝缘中,电场分布取决于介电常数  $\varepsilon$ ,可根据高斯定理容易得到其电场分布表达式。直流电缆绝缘中的电场分布更复杂,研究难度也更高。一般认为,直流电缆绝缘中的电场分布取决于电阻率。国内学者针对电阻率进行了大量的研究,并提出了电阻率与温度及电场的理论关系式 [7]。

国内有个别学者据此研究了直流电缆绝缘中的电场表达式 [8],但是并未形成大众认可的结论。另外,未有学者针对交、直流电缆绝缘中的电场分布进行比较研究,也未提出这两种分布差异的根本原因。

本文在高斯定理基础上,提出了全新的直流电缆绝缘中电场分布理论,分析了电阻率对电场分布的影响,研究了交、直流电场分布的联系。

## 2 直流电缆绝缘电场理论研究

图1为直流电缆结构简单示意图,包括导体及绝缘,并忽略了内、外屏蔽厚度。其中,直流电缆导体半径为  $r_c$ ,绝缘外半径为  $R$ 。以半径为  $r_c$  的圆周面为内环面,以半径为  $r$  的圆周面为外环面,形成如图所示的闭合面  $S_r$ 。

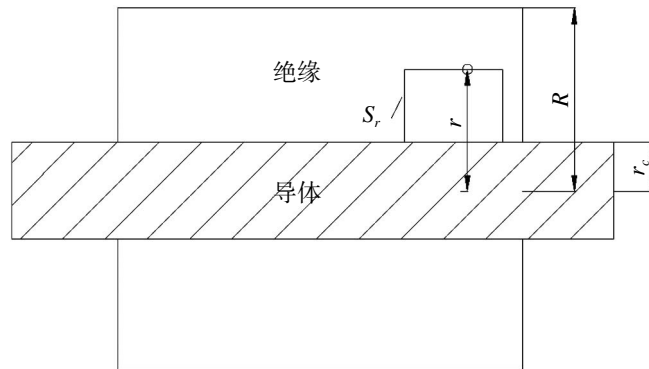


图1 直流电缆结构示意图

Figure 1 The diagram of DC cable

根据高斯定理对电缆单位轴向长度的闭合面  $S_r$  进行积分, 可得如下关系式:

$$\iint_{S_r} \varepsilon E dS = Q_r \quad (1)$$

式中,  $\varepsilon$  为介电常数,  $E$  为闭合面  $S_r$  上的电场强度 (kV/mm),  $Q_r$  为此闭合面内电荷量 (C)。

根据欧姆定理, 单位长度电缆绝缘电阻为

$$R' = \int_{r_c}^R \frac{\rho}{2\pi r} dr = \frac{\rho}{2\pi} \ln \frac{R}{r_c} \quad (2)$$

式中,  $\rho$  为绝缘电阻率, 可表示为

$$\rho = \rho_0 \frac{e^{-aT}}{E^\gamma} \quad (3)$$

式中,  $\rho_0$  为参考温度 (0 °C) 和电场 (1 kV/mm) 下的电阻率 ( $\Omega \cdot m$ ),  $a$  为电阻率温度系数 ( $1/^\circ C$ ),  $\gamma$  为常数,  $E$  为电场强度 (kV/mm),  $T$  为温度 ( $^\circ C$ )。对于交联聚乙烯材料, 其值分别为 0.1 ( $1/^\circ C$ ) 和 2.2。

根据电缆发热方程及等值热路, 式 (3) 中的  $T$  可表示为

$$T = T_c - \Delta T \frac{\ln \frac{r}{r_c}}{\ln \frac{R}{r_c}} \quad (4)$$

式中,  $T_c$  为导体温度 ( $^\circ C$ ),  $\Delta T$  为绝缘层温差 ( $^\circ C$ )。

结合式 (2)、(3) 和 (4), 并将式 (3) 中的  $E$  近似表示为  $\bar{E}$  (平均场强), 可得

$$R' = \frac{\rho_0}{2\pi \bar{E}^\gamma e^{aT_c} \frac{a\Delta T}{\ln \frac{R}{r_c}} r_c} \quad (5)$$

在电压  $U$  下, 单位长度电缆相应的径向电流可表示为

$$I = \frac{U}{R} = \frac{2\pi U \bar{E}^\gamma e^{aT_c} \frac{a\Delta T}{\ln \frac{R}{r_c}} r_c}{\rho_0} \quad (6)$$

如图 1 所示, 在直流电场下, 位于任意位置  $r$  和内半径  $r_c$  绝缘层内的载流子的渡越时间  $t$  可表示为:

$$t = \frac{r - r_c}{\mu E} \quad (7)$$

式中,  $\mu$  为绝缘中载流子迁移率 [ $\text{m}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ ],  $\bar{E}$  为电缆绝缘中平均电场强度 ( $\text{kV/mm}$ )。

结合式 (6) 和 (7), 将  $Q_r = It$  代入式 (1) 并简化, 可得

$$E_r = \frac{I}{2\pi \varepsilon \mu \bar{E}} + (E_c r_c - \frac{I r_c}{2\pi \varepsilon \mu \bar{E}}) \frac{1}{r} \quad (8)$$

式中,  $E_r$  为电缆绝缘  $r$  处径向电场 ( $\text{kV/mm}$ ),  $E_c$  为电缆绝缘  $r_c$  处径向电场 ( $\text{kV/mm}$ )。

电缆绝缘层电场沿径向的积分值等于绝缘外加电压, 可表达为

$$\int_{r_c}^R E_r dr = U \quad (9)$$

将式 (8) 代入式 (9), 可得

$$E_c = \frac{I}{2\pi \varepsilon \mu \bar{E}} + \frac{U - \frac{I(R - r_c)}{2\pi \varepsilon \mu \bar{E}}}{r_c \ln \frac{R}{r_c}} \quad (10)$$

将式 (10) 代入式 (8) 并简化, 可得

$$E_r = \frac{k_1}{\rho_0} + \frac{1}{\ln \frac{R}{r_c}} \left[ U - \frac{k_1(R - r_c)}{\rho_0} \right] \frac{1}{r} \quad (11)$$

$$\text{式中, } k_1 = U \bar{E}^{\gamma-1} e^{aT_c} \frac{a\Delta T}{\varepsilon \mu \ln \frac{R}{r_c}} r_c \frac{a\Delta T}{\ln \frac{R}{r_c}}$$

### 3 直流电缆绝缘中的电场分布

根据上节研究,在电缆相关参数已知情况下,能得到其绝缘层中的电场分布。本节以国内已投运的  $\pm 320$  kV 直流电缆为例,分析了其中的电场分布。

对于  $\pm 320$  kV 直流电缆,参考其结构设计,与式 (11) 相应的参数可表示为:  $U=320$  kV,  $\varepsilon=1.96 \times 10^{-11}$ ,  $\rho_0=1 \times 10^{15}$  ( $\Omega \cdot \text{m}$ ),  $\mu=1.0 \times 10^{-12}$  ( $\text{m}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ ) [9] [10],  $\bar{E}=14.5$  (kV/mm),  $R=50$  mm,  $r_c=28$  mm,  $T_c=90$   $^{\circ}\text{C}$ ,  $\Delta T=20$   $^{\circ}\text{C}$ 。将相关参数代入式 (11),经计算可表示为

$$E_r=32.4-676 \times \frac{1}{r} \text{ (kV/mm)} \quad (12)$$

根据式 (12),  $\pm 320$  kV 直流电缆绝缘中的电场分布如图 2 所示。

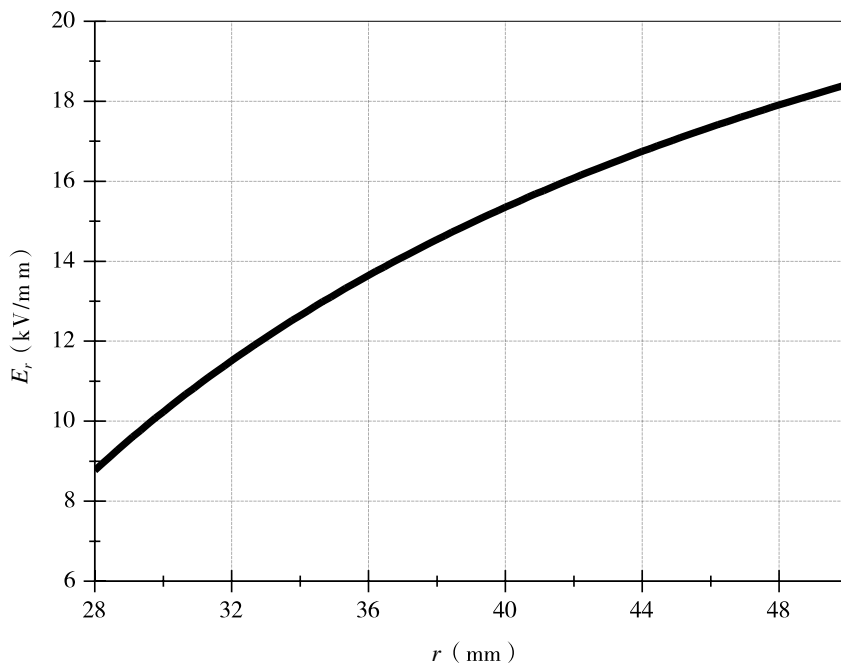


图 2  $\pm 320$  kV 直流电缆绝缘电场分布

Figure 2 The distribution of electric field in the insulation for  $\pm 320$  kV DC cable

由图 2 可知,随着直流电缆半径增加,电场变大,最大值出现在绝缘层最外位置。 $\pm 320$  kV 直流电缆绝缘的最大电场值为 18.88 kV/mm,比相应的平均电场值高出约 30%。

在直流电缆连接件（接头和终端）的设计过程中，电缆绝缘和连接件应力锥界面设计是难点也是重点。由于界面存在，较易引入杂质并易产生陷阱，在直流电场下，此处更易积累空间电荷，其本身是绝缘结构的薄弱环节。但由上可知，直流电缆绝缘最大电场出现在绝缘外部（界面位置）。这样，薄弱的界面在较高电场下易于积聚空间电荷，并发生击穿。并且随着直流电缆电压等级升高，界面处的电场越大，即发生击穿可能性越高。

因此，对于直流电缆本身或者直流电缆连接件来说，都需要降低电缆绝缘外部的电场，减少绝缘击穿风险。

## 4 电阻率对电场分布影响

### 4.1 电场反转与电阻率关系

对于直流电缆绝缘电场分布公式（11）而言，电阻率  $\rho_0$  影响绝缘的电场分布。在式（11）中，令

$$k_2 = \frac{1}{\ln \frac{R}{r_c}} \left[ U - \frac{k_1(R-r_c)}{\rho_0} \right] \quad (13)$$

则式（11）可简化为

$$E_r = \frac{k_1}{\rho_0} + k_2 \frac{1}{r} \quad (14)$$

当  $k_2$  为正数时，随着半径  $r$  增加，电场  $E_r$  变小，而最大电场位于绝缘内径处；当  $k_2$  为负数时，随着  $r$  增加，电场  $E_r$  变大，电缆绝缘中最大电场位置发生反转，位于绝缘外径处。这样，可以认为  $k_2=0$  为电场分布出现“反转”的临界条件，可表达为

$$\rho_0 = \frac{k_1(R-r_c)}{U} \quad (15)$$

即  $\rho_0 < \frac{k_1(R-r_c)}{U}$  时，电场  $E_r$  与半径  $r$  正相关，而  $\rho_0 > \frac{k_1(R-r_c)}{U}$  时，电场  $E_r$  与半径  $r$  负相关。

以  $\pm 320$  kV 直流电缆为例，根据式（15）并参考第3节参数，可以得出电场分布出现反转时，临界电阻率  $\rho_0 = 2 \times 10^{15} \Omega \cdot \text{m}$ 。在  $\rho_0$  周围另外选择了两个电阻

率值  $\rho = 1 \times 10^{15} \Omega \cdot \text{m}$ ,  $1 \times 10^{16} \Omega \cdot \text{m}$ , 并将值代入式 (13) 中, 可得如下表达式

$$\begin{cases} E_r = 30.7 - 614 \times \frac{1}{r}, \text{ kV/mm} & (\rho_0 = 1 \times 10^{15} \Omega \cdot \text{m}) \\ E_r = 14.5, \text{ kV/mm} & (\rho_0 = 2 \times 10^{15} \Omega \cdot \text{m}) \\ E_r = 3.07 + 435 \times \frac{1}{r}, \text{ kV/mm} & (\rho_0 = 1 \times 10^{16} \Omega \cdot \text{m}) \end{cases} \quad (16)$$

根据式 (16), 可得  $\pm 320 \text{ kV}$  直流电缆绝缘可得出不同电阻率情况下的电场分布, 如图 3 所示。由图 3 可知, 当电阻率小于临界电阻率  $\rho_0$  时, 绝缘电场随着半径增加而增加, 最大电场出现在绝缘外部。当电阻率为  $\rho_0$  时, 绝缘中电场处处相等。而当电阻率大于临界电阻率  $\rho_0$  时, 绝缘电场随着半径增加而减少, 绝缘外部电场最小。

这样, 随着绝缘电阻率  $\rho_0$  增加, 绝缘中电场分布出现明显变化, 电缆绝缘外部电场逐渐变小。由第 3 节可知, 电缆绝缘外部电场变小有利于直流电缆连接件设计。这说明, 在一定范围内提高直流电缆绝缘材料电阻率有利于电缆系统结构设计, 并降低绝缘击穿风险。

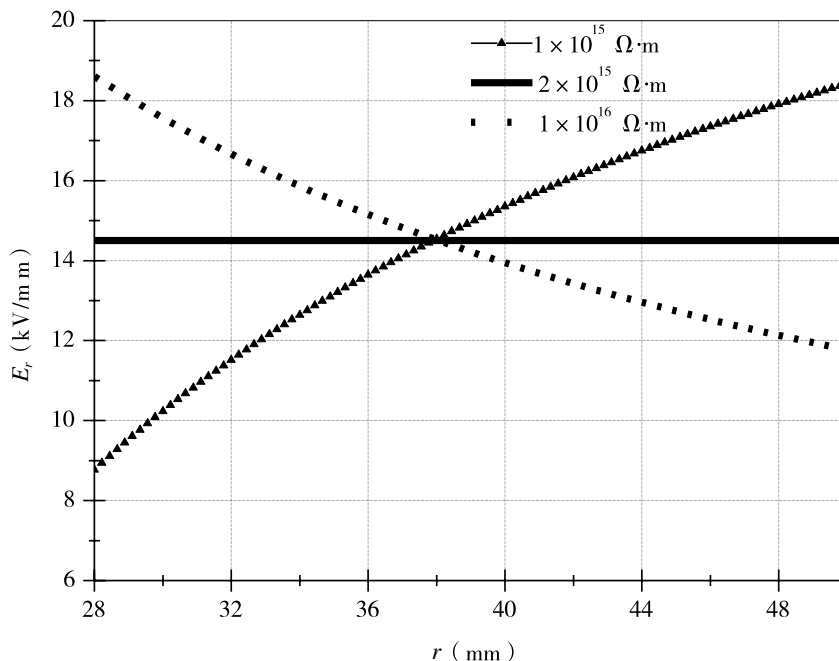


图 3  $\pm 320 \text{ kV}$  直流电缆绝缘在不同电阻率  $\rho_0$  下的电场分布

Figure 3 The distribution of electric field in the insulation of  $\pm 320 \text{ kV}$  DC cable with the different resistivities



## 4.2 电缆绝缘的交直流电场分布联系

由 4.1 节可知, 当电阻率大于临界电阻率  $\rho_0$  时, 直流电缆绝缘中电场随着半径增加而减少。而交流电缆绝缘中电场也随着半径增加而减少。从这点来看, 在一定条件下, 电缆绝缘的这两种电场分布是类似的, 本节研究了它们之间的联系。

将式 (11) 进一步变换, 可得

$$E_r = \frac{U}{R} + \frac{k_1}{\rho_0} \left( 1 - \frac{R-r_c}{r \ln \frac{R}{r_c}} \right) \quad (17)$$

由上式可知, 随着电阻率  $\rho_0$  增大, 式中后一项变小。当  $\rho_0$  增至一定值后, 此项趋于 0。这样, 直流电缆绝缘电场公式 (17) 即变为交流电缆绝缘公式

$$E_r = \frac{U}{R} \frac{1}{r \ln \frac{R}{r_c}} \quad (18)$$

以  $\pm 320$  kV 柔直电缆为例, 令  $\rho_0 = 1 \times 10^{16} \Omega \cdot \text{m}$ ,  $5 \times 10^{16} \Omega \cdot \text{m}$ , 引用第 3 节中相关参数并代入式 (17), 其电场分布如图 4 所示。为便于对比, 将电缆绝缘在交流下的电场分布也显示在图中。

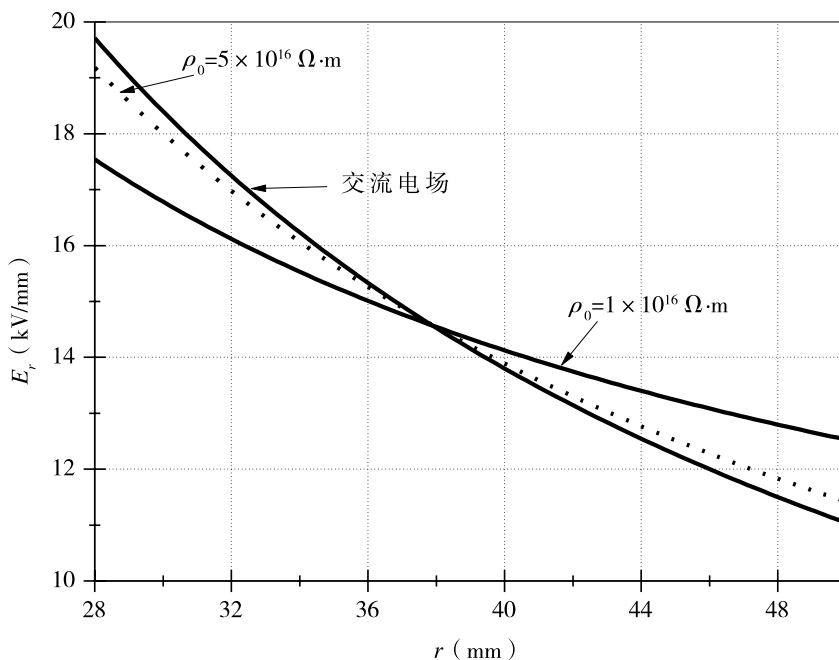


图 4 电缆绝缘的直流电场分布与交流电场分布比较图

Figure 4 Comparison of the DC and AC field distribution in the cable insulation

由图可知,随着绝缘电阻率增大,其直流电场分布与交流电场分布趋于一致。这归因于随着绝缘电阻增大,绝缘中电荷量变小并趋于 0。而根据式(1),当直流电缆绝缘中的  $Q_r=0$ ,其电场分布与交流电场分布一致。因此,电缆绝缘的交流、直流电场分布存在着密切联系,当电缆绝缘的电阻率足够大时,两者趋于一致。

## 5 结论

本文基于高斯定理研究了直流电缆绝缘中的电场分布,提出了具体的理论表达式。利用此表达式并根据具体参数研究了实际的  $\pm 320$  kV 直流电缆绝缘中的电场分布。

电阻率对直流电缆绝缘电场分布存在较大的影响,随着电阻率增加,电场分布发生“反转”,最大电场位置由外变内。另外,当电阻率足够大时,电缆绝缘的直流电场分布与交流电场分布趋于一致。

## 基金项目

国家电网公司科技项目“90℃柔性直流电缆绝缘料及海底电缆系统关键技术研究”资助的课题。

## 参考文献

- [1] 胡兆庆,毛承雄,陆继明,等.一种新型的直流输电技术——HVDC Light[J].电工技术学报,2005,20(7):12-16.
- [2] Chen X, Wang X, Wu K, et al. Effect of voltage reversal on space charge and transient field in LDPE films under temperature gradient[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(1): 140-149. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2012.6148512>
- [3] Hao S, Zheng F, Wang W, et al. Space charge behavior of linear low density polyethylene doped with some types of inorganic nano powder[C]//Proceedings International Symposium Electrical Insulating Materials (ISEIM'08),

- Yokkaichi, Japan, 2008: 364–367.
- [4] 郑煜, 吴建东, 王俏华, 等. 空间电荷与直流电导联合测试技术用于纳米 MgO 抑制 XLPE 中空间电荷的研究 [J]. 电工技术学报, 2012, 27 (5): 126–131.
- [5] 杨强, 安振连, 郑飞虎, 等. 线性低密度聚乙烯中空间电荷陷阱的能量分布与空间分布的关系 [J]. 物理学报, 2008, 57 (6): 3834–3839.
- [6] Zhang Y W, Lewiner J, Alquie C, et al. Evidence of strong correlation between space-charge buildup and breakdown in cable insulation [J]. Dielectrics & Electrical Insulation IEEE Transactions, 1996: 778–789.  
<https://doi.org/10.1109/94.556559>
- [7] 杨佳明, 王暄, 韩宝忠, 等. LDPE 纳米复合介质的直流电导特性及其对高压直流电缆中电场分布的影响 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34 (9): 1454–1461.
- [8] 刘子玉. 电气绝缘结构设计原理 (上册) [M]. 北京: 机械工业出版社, 1981: 302–310.
- [9] Hayashi K, Yoshino K, Inuishi Y. Carrier Mobilities in Insulating Polymers Measured by Time of Flight Method [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1975, 14 (1): 39–45. <https://doi.org/10.1143/JJAP.14.39>
- [10] Yoshino K, Kyokane J, Nishitani T, et al. Electron-beam-induced conduction in polyethylene [J]. Journal of Applied Physics, 1978, 49 (9): 4849–4853. <https://doi.org/10.1063/1.325516>