矿用通信电缆基本电气参数数值模型

成凌飞 王泰华
（河南理工大学电气工程与自动化学院 焦作 454000）

摘要 矿用通信电缆是矿井监控系统传输监控信号的主要介质。由于缺乏测试数据，无法建立矿用通信电缆基本电气参数的数值模型，给矿井监控系统传输性能的分析研究带来很大的困难。本文借鉴 BT#0 数值模型，参考六种不同线规普通双绞线的数值模型参数，运用数据拟合的方法，推导出三种具有代表性的矿用通信电缆的数值模型参数，从而建立了基本电气参数的数值模型，并根据模型分析了电缆的电气特性。

关键词：矿用通信电缆 基本电气参数 数值模型 数据拟合
中图分类号： TD611; TM248

Primary Parameter Models of Mine Communication Cables

Cheng Lingfei Wang Taihua
（Henan Polytechnic University Jiaozuo 454000 China）

Abstract Mine communication cable is a kind of primary transmission line transmitting the monitor signal. As lack of test data, the primary electric parameter models of mine communication cable cannot be established, so it is difficult to analyze the transmission characteristics of mine monitor. Referencing the BT#0 numerical model and common twisted pair model parameters of six gauges and using the data fitting method, this paper calculates the numerical model parameters of three kinds of mine cables and establishes the models. According to the models, the characteristics of primary electric parameters of mine communication cable are studied.

Keywords： Mine communication cable, primary electric parameter, numerical model, data fitting method

1 引言

我国的煤炭开采主要以井下开采为主。井下工作环境恶劣，存在甲烷等爆炸性气体，巷道内弥漫着煤尘，有淋水、潮湿、空间狭小，工作场所分散且相互距离较远。发生瓦斯爆炸、煤尘爆炸、火灾、水灾、顶板垮落等事故时，矿工的人身安全和健康受到威胁，煤矿的安全生产也受到很大的影响[1]。据统计，近几年全国煤矿每年死亡人数一直徘徊在六千多人左右，约占全国矿山企业死亡人数的 80%以上，占全国工业企业死亡人数的 60%，安全问题已经成为煤炭行业工作的重中之重[2]。因此，对井下环境参数的监测及对生产设备的监控有着非常重要的意义。

普通监控系统中用来传输信号的介质主要有三种：光纤、同轴电缆和双绞线。光纤受到弯曲时容易产生损耗，然而井下巷道交叉纵横，弯曲、倾斜、拐角和分支大量存在，传输线必须沿巷道壁敷设，因此光纤的弯曲不可避免。另外，光纤的接续需要专门的设备和专业知识，给施工和维护带来了一定的困难[3]。这两点限制了光纤在煤矿井下的使用。同轴电缆和普通双绞线存在抗干扰能力差、无法长距离传输等缺陷。因此，这两种介质也不适合矿井监控系统。根据《煤矿安全规程》第四百六十七条第九款的规定[4]：“照明、通信、信号和控制用的电缆，应采用铠装或非铠装通信电缆、橡套电缆或 MVV 型塑力缆。”

国家自然科学基金（ 50674093）和河南理工大学博士基金（B2009-1）资助项目。
收稿日期 2009-01-23 改稿日期 2010-02-21

由于缺乏矿用通信电缆基本电气参数的测试数据和标准，对研究矿用通信电缆传输性能造成了一定的困难。本文参考国外不同规格双绞线的数值模型，利用数据拟合的方法，建立矿用通信电缆的近似数值模型。

2　参考双绞线的数值模型

各标准化组织对不同线规、不同规格双绞线的基本参数进行了大量的测量，得到了很多试验数据。为了避免在实际使用过程中查阅众多的测量数据表格，为了利用计算机进行模拟仿真，各标准化组织在测量数据的基础上，总结、推导出一系列的双绞线数值模型。本文参考的是运用最广泛的英国电讯模型 BT#0[4-9]。这种数值模型可以模拟从直流到几十兆赫的双绞线电气参数，包括电阻数值模型、电感数值模型、电容数值模型和电导数值模型。

电阻数值模型[10]为

$$R(f)=\sqrt[4]{R_{oc}^4+a_c f^2} \tag{1}$$

式中　R_{oc}——直流电阻；

a_c——与导线中导体的相对磁导率有关的参数。

电感数值模型[10]为

$$L(f)=\frac{L_0+L_\infty\left(\frac{f}{f_m}\right)^b}{1+\left(\frac{f}{f_m}\right)^b} \tag{2}$$

式中，参数 b 和 f_m 用来调整电感值随频率的变化在 L_0 和 L_∞ 之间变化。

电容数值模型[10]为

$$C(f)=C_\infty+C_0 f^{-c_e} \tag{3}$$

绝缘很好时，参数 C_0 可以忽略，直接以 C_∞ 作为模型。

电导数值模型[10]为

$$G(f)=g_0 f^{g_e} \tag{4}$$

BT#0 模型由 11 个参数构成，分别为 R_{oc}、a_c、L_0、L_∞、f_m、b、C_∞、C_0、c_e、g_0 和 g_e。如果确定了这 11 个参数，根据式（1）～式（4）就可以得到双绞线的基本电气参数。使用 BT#0 模型的国家很多，如美国、英国、法国等。不同的国家常用双绞线的线径不尽相同。本文以美国线规（AWG）、法国线规（FT）和英国线规（BT）中六种型号的双绞线为例，根据这些双绞线的数值模型参数，推导确定矿用通信电缆的数值模型参数。表 1 列出这六种型号双绞线的数值模型参数[11]。

影响双绞线基本参数的最主要因素是双绞线的线径。从表 1 可以看出，大多数的数值模型参数随线径的变化有规律地变化。因此，可以考虑采用数据拟合的方法，在已有的线径和参数值的基础上，根据矿用通信电缆的线径估算出矿用通信电缆的数值模型参数。

表 1　普通双绞线数值模型参数

Tab.1　Numerical model parameters of common twisted pair cables

参数	线规					
	AWG26（0.4mm）	AWG24（0.5mm）	FT_06（0.6mm）	FT_08（0.8mm）	BT_dw12（0.9mm）	BT_dw8（1.14mm）
R_{oc}	286.175 78	174.558 88	122.577	65.804	55.460 555	41.16
a_c	0.147 696 20	0.053 073 481	0.044	0.012	4.9924627e−3	1.218e−3
L_0	675.36888e−6	617.29539e−6	0.72e−3	0.74e−3	0.62104396e−3	1e−3
L_∞	488.95186e−6	478.97099e−6	0.48e−3	0.51e−3	461.954e−6	910.505e−6
f_m	806 338.63	553 760	331 600	180 800	193049	174 877
b	0.929 307 28	1.1529 766	0.786	0.756	0.939 709 31	1.195
g_0	43e-9	234.87476e−15	3.033e−10	2.92e−7	20e−9	53e−9
g_e	0.70	1.38	1.095	0.606	0.88	0.88
C_0	—	—	1.581e−6	8.998e−7	5.8022458e−9	31.78e−9
C_∞	49e−9	50e−9	4.852e−8	4.479e−8	51.128076e−9	22.68e−9

c_e	—	—	0.683	0.626	0.100 645 77	0.1109

3 矿用通信电缆数值模型参数的确定

3.1 矿用通信电缆的选型

表 2 列出六种具有代表性的矿用通信电缆主要性能指标[1]。

矿用通信电缆通常将多根双绞线芯包在护套中形成一根电缆，如型号为 MHYV 7/0.28 的矿用通信电缆，是由 7 根线芯直径为 0.28mm 的导线拧成一股而成的。为了计算方便以及与其他型号双绞线的比较，表 2 中列出了每种矿用通信电缆的等效直径。等效直径的计算公式为

$$\pi\left(\frac{D_e}{2}\right)^2 = n\pi\left(\frac{D}{2}\right)^2 \qquad (5)$$

式中 n——线芯的根数；

D——单根线芯的直径；

D_e——等效直径，$D_e = \sqrt{n}D$。

从表 2 矿用通信电缆的性能指标可以看出，1/1.38 型电缆的直流电阻和固有衰减最小，等效直径最大；7/0.28 型电缆直流电阻最大，等效直径最小，固有衰减最大；1/1.0 型的各项参数居于上述几种型号中间。因此，本文将选择 1/1.38 型、1/1.0 型和 7/0.28 型三种矿用通信电缆建立参数数值模型。

3.2 数据拟合方法

在数据拟合之前必须对表 1 中的数据进行预处理，去除界外值、缺失值和重复值，以减少人为误差，提高拟合的精度[12]。处理的方法为首先绘制出线径－参数的散点图，然后观察判定需要剔除的数据。如表 1 中 AWG24 双绞线的 g_0 参数，数量级与附近的数据相差甚远，显然应该被剔除。事实上，在原始文献中，该参数也被作者以黑体标出，表明对这个数据有疑问。

Matlab 软件的曲线拟合工具箱中提供了多种模型，包括指数模型、傅里叶级数模型、高斯模型、多项式模型等等。将欲拟合的数据导入工作空间后，根据数据特点选择拟合模型，然后依照拟合优度统计量评价拟合优度。本文采用的统计量是 R^2。R^2 可以取 0～1 之间的所有值，值越接近 1，拟合效果越好。下面以 R_{oc} 参数为例，说明 数值模型参数的确定方法。

根据 R_{oc} 参数的参考数据，选择曲线拟合工具箱中的指数模型，得到如下拟合公式：

$$R_{oc} = 4040e^{-7.751d} + 207.4e^{-1.519d} \qquad (6)$$

曲线拟合工具箱显示 R^2=0.999 14，非常接近于 1。由式（6）绘制出参考数据与拟合曲线的比较图，如图 1 所示。可以看出，拟合效果相当好。

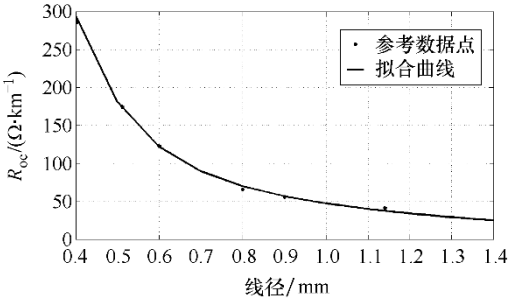


图 1 R_{oc} 拟合曲线

Fig.1 Curve of parameter R_{oc}

式（6）中的 R_{oc} 只是线径的函数，可以根据矿用通信电缆的线径计算出对应矿用通信电缆的 R_{oc} 参数值。

表 3 列出根据以上介绍的拟合方法得到的矿用通信电缆数值模型参数。

表2 矿用通信电缆主要性能指标

Tab.2 Primary parameters of mine communication cables

参 数	型 号					
	MHYV	MHYVP	MHYVRP	MHYBV	MHYBVR	MHYR32
	7/0.28	1/1.38	7/0.37	1/1.0	7/0.43	7/0.52
等效直径/mm	0.741	1.38	0.979	1.0	1.138	1.376
20℃直流电阻/(MΩ・km)	≤45	≤12.1	≤24.8	≤22.8	≤18.1	≤12.1
固有衰减/(dB・km^{-1})	≤1.1	≤0.5	≤0.8	≤0.7	≤0.65	≤0.5

20℃绝缘电阻/(MΩ・km)	≥3000	≥5000	≥5000	≥5000	≥5000	≥5000
线对工作电容/(μF・km^{-1})			≤0.06			
电感/(μH・km^{-1})			≤800			

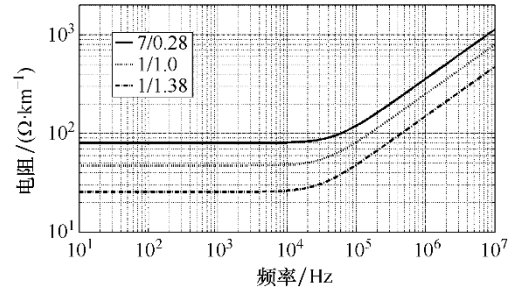
表3　矿用通信电缆数值模型参数

Tab.3　Numerical model parameters of mine communication cables

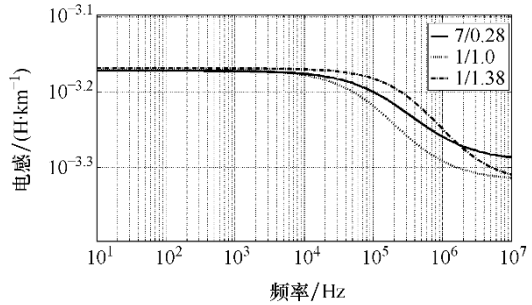
参数	线规		
	7/0.28 型	1/1.0 型	1/1.38 型
R_{oc}	80.2364	47.1447	25.5851
a_c	1.6039e−002	3.9021e−003	4.9077e−004
L_0	6.7365e−004	6.7566e−004	6.7862e−004
L_∞	5.1118e−004	4.8211e−004	4.7772e−004
f_m	3.0108e+005	1.7265e+005	7.6348e+005
b	0.94811	0.99232	1.0609
g_0	1.0319e−008	1.9442e−008	4.9241e−008
g_e	0.887	0.84	0.775
C_0	3.4973e−008	3.8744e−008	1.5356e−009
C_∞	4.8485e−008	4.8078e−008	4.7488e−008
c_e	0.41501	0.15357	3.5714e−002

4　矿用通信电缆基本电气参数特性

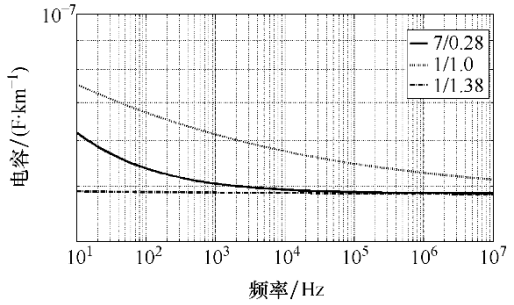
将表 3 中的数值模型参数代入式（1）～式（4），即可得到矿用通信电缆的基本电气参数。图 2 表示



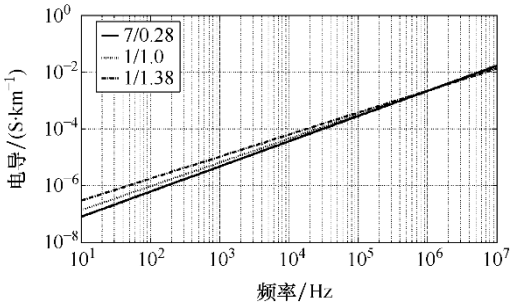
（a）电阻曲线



（b）电感曲线



（c）电容曲线



（d）电导曲线

图 2　矿用通信电缆基本电气参数特性曲线

Fig.2　Characteristic curves of mine communication cable primary electric parameters

利用这种方法得到的三种矿用通信电缆的基本电气参数随频率变化的性质。

5　结论

由于缺乏测试数据，无法建立矿用通信电缆基本电气参数的数值模型，使其成为矿井监控系统传输性能研究的瓶颈。本文借鉴已有的数值模型，参考不同线规普通双绞线的数值模型参数，运用数据拟合的方法，推导出矿用通信电缆的数值模型参数，从而建立了矿用通信电缆基本参数数值模型，为进一步研究矿井监控系统提供了便利。

参考文献

[1]　孙继平. 矿井安全监控系统 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2006.

[2]　成凌飞. 矿用 ADSL 传输性能研究 [D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2008.

[3] 穆道生. 现代化光纤通信系统 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.

[4] Lindholm M.Characteristics of twisted pair cables in Finland[C]. ETSI-TM6 Contribution TD22, Tel Aviv, Israel, 1997.

[5] Musson J.Maximum likelihood estimation of the primary parameters of twisted pair cables[C]. ETSI-TM6 Contribution TD8, Madrid, Spain, 1998.

[6] Pythoud F. Model of swiss access network cables[C]. ETSI-TM6 Contribution TD48, Madrid, Spain, 1998.

[7] Van den Brink R. Measurements and models on Dutch cables[C]. ETSI-TM6 Contribution TD15, Tel Aviv, Israel, 1997.

[8] Van den Brink R.A round robin test on cable measurements[C]. ETSI-TM6 Contribuion TD16, Tel Aviv, Israel, 1997.

[9] Vautier M.RLCG parameters for France telecom copper cables[C]. ETSI-TM6 Contribution TD25, Sophia Antipolis, France, 1996.

[10] Van den Brink R. Cable reference models for simulating metallic access networks[C]. ETSI STC TM6, 1998.

[11] Rauschmayer D J. ADSL/VDSL principles[M]. Indiana: Macmillan Technical Publishing, 1999.

[12] 任玉杰. 数值分析及其 Matlab 实现[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.

作者简介:成凌飞　男，1971 年生，副教授，硕士生导师，主要从事矿井监控及移动通信的研究。 王泰华　男，1976 年生，硕士，讲师，主要从事矿井监控及控制工程的研究。