

载波通路和群路的 负荷及计算

阿.姆.斯根林哥
〔苏〕 阿.乌.奥尔诺夫 著
阿.斯.阿纳聂夫
黄明光 译

中 国 铁 道 出 版 社

1983年·北京

ЗАГРУЗКА КАНАЛОВ
И ГРУППОВЫХ ТРАКТОВ
А.М.Зингеренко, А.В.Орлов, А.С.Ананьев
Издательство «Связь»

Москва 1977

载波通路和群路的负荷及计算

阿.姆.斯根林哥

〔苏〕 阿.乌.奥尔诺夫 著

阿.斯.阿纳聂夫

黄明光 译

中国铁道出版社出版

责 任 编 辑 张 冲

新华书店北京发行所发行

各 地 新 华 书 店 经 售

中国铁道出版社印刷厂印

开本: $787 \times 1092 \frac{1}{4}$ 印张: 4.5 字数: 100 千

1983年2月第1版 1983年2月第1次印刷

印数: 0001—5,000册 定价: 0.60元

译 者 序

现代长途通信仍以载波通信为主。在载波设备总体设计中，通路及群路负荷是主要的问题之一，也是经常争论的焦点之一。考虑方法及取值不同，对质量及经济影响很大。

本书对载波通路及群路负荷的定性和定量讨论皆比较深入，最后还加入许多有用的实例和详细演算。为了有助于在载波设备总体设计、制造和维修中正确处理通路及群路负荷，现将本书译出，以供参考。

译稿经铁道部直属通信处赵玉芙同志全部校阅，并提出许多宝贵意见，深为感谢。由于译者水平有限，不当和错误之处，敬请读者批评指正。

译 者

序

在一个统一的自动通信网的建设中，多路通信系统的通路及群路，不仅要能传输电话信号，而且还要能传输自动控制系统中的数据信号。通信技术的重要任务之一，就是利用原有的和新建的多路通信系统，使其通路及群路特性能符合传输不同信息所要求的参数。使用频分制多路系统，其通路及群路负荷可以符合该参数要求。要解决这一课题，应注意在频分制多路系统中，即使一个音频通路过负荷也能引起群路过负荷，导致降低传输质量，或使通信全部破坏。但是随便降低发送信号的功率，也会降低传输信息的可靠性。

解决通路及群路负荷问题，基本上是计算各种信号及多路信号总的统计特性，由此特性来计算线路放大器的过负荷门限值及其线性关系。但是，也容许有极少概率使多路信号超过门限功率。由于在过负荷门限值以下，若给定概率，则可对群路信号的功率进行大概的估算。对于求多路通信系统的放大器及其它设备非线性衰耗，或已知非线性衰耗值求非线性干扰，均应知非线性干扰的频谱分布、信号间的关系及设备参数的统计特性。

本书各章节主要研究加入白噪音的多路电话信号及电视信号的综合作用。在负荷及非线性失真理论方面，有些专家的著作提出的建议是属于多路电话信号传输的，因此对于用其它信号做通路和群路负荷的情况不能完全适用。而对于比较小的系统，甚至纯粹是电话负荷时，则缺乏有依据的介绍。

根据多路系统中各种信号瞬时电压叠加规律，用随机平稳各态历经的过程来研究多路信号是最近似的方法，并且要用概率理论中的中心极限定理来分析。为了对小通路系统便于采用数学期望方法，可得简单的不等式，所求概率满足此不等式。当求群路中语言信号平均功率叠加规律时，电话通路在已知时间内的有效通路数，应看成在标准条件下具有一定平均值和偏差值。数学统计原理，也适用于任何数量的通路。

在一些书籍中，希望解决这样一项课题，就是研究多路通信系统具有任何通路数的群路及通路的能量特性参数。为此，要研究语言信号和数字信号的统计特性，及其瞬时功率与平均功率的叠加规律。并引导读者计算通路及群路负荷、非线性干扰，以及提出对非线性衰耗的要求。

技术硕士А.П.Удалов详细审阅原稿，并提出改进本书的宝贵意见，作者深为感谢。

作 者

目 录

引 言	1
第一章 语言信号的基本特性	4
第二章 限制语言信号的统计参数	12
第三章 语言信号平均功率的叠加	21
第四章 语言信号瞬时电压的叠加	30
第五章 数字信号	44
第六章 复合群路信号	58
第七章 频率复用通路传输二数码时, 群路瞬间过 负荷对误码率的影响	76
第八章 通路及群路的非线性失真	90
第九章 对通路线性及负荷的要求	103
附录 I 传输一个信号时二次和三次组合波的频谱 分布	111
附录 II 传输一个均匀分布的信号时二次和三次组 合波的频谱分布	114
附录 III 传输二个信号时二次和三次组合波的频谱 分布	116
参考资料	129

引 言

群路中的元部件或多或少地都具有非线性。这样，在群路输出端会出现输入端所没有的新的频率成分，使个别报路引起传输失真，通路之间也互相干扰。对这种非线性特性，可由四端网络输入和输出的瞬时电压（或电流）值来分析。在大多数情况下，群路负荷可计算其有效值。输出与输入之间的关系，可由下列系数决定：

$$u_2 = a_1 u_1 + a_2 u_1^2 + a_3 u_1^3 + \cdots + a_n u_1^n + \cdots \quad (1)$$

式中 u_1 、 u_2 ——群路的输入和输出端瞬时电压值。

对于有线通信多路系统中极大部分的非线性干扰，可认为是由群发送放大器造成的。现代的群放大器具有深反馈，它将输出端的电压反馈至输入端，使放大器的非线性程度大为减少。群放大器的工作状态，以其输入端的群路信号的瞬时值来计算，放大器的工作频带基本上不要在振幅特性的弯曲部分。在这种情况下，非线性失真的产物决定于有用信号的电压值和功率值。非线性产物所占有的频带宽度，比放大器输入端原有的信号频带更宽，它不仅存在于本通路内，而且还串入频带合适的其它通路之中。这样，在传输电报信号时的通路之间，多路系统便产生路际干扰。通路中呈现的非线性干扰，常常表现为一种杂音，在接收模拟信号和数字信号时均受影响。当群发送放大器工作于振幅特性非线性区段时，由于非线性的作用，通路间就互相干扰。尤其是传送导频、呼叫信号和其它输入信号所组成的群路信号时，会产生连续的谐波成分，甚至产生可懂串音。在通路里是不允许有

可懂串音的，它不仅干扰有用信号，而且失密。当通路传输语言信号时，群路非线性干扰很明显，并令人讨厌。在通话停止后，它仍作为杂音而继续影响通路。

由于非线性干扰不能用滤波器来消除，因此只能对群路设备的振幅特性的线性方面提出更高的要求。具体的方法就是在工作频带内加深群发送放大器输入端的负反馈来改善振幅特性的线性关系。瞬间的过负荷在通路中会出现“格裂”声，一般对传送语言信号来说，其干扰作用不明显。因此，当通路传输语言信号时，首先必须计算群路的非线性过负荷点，不许其超过门限值而过负荷。

当分析非线性对群路传输语言信号的影响时，主要是计算分布在某通路频带内非线性杂音的平均功率值。在这种情况下，发送放大器的工作区段必须限制在振幅特性的过负荷点之前。分析时可利用公式（1）的关系，并忽略高于三次方的各项。这时非线性产物的功率是发送放大器输入端有用信号功率的函数。在放大器输入端有用信号功率未超过放大器过负荷的门限值时，此函数的关系才成立。当分析群路非线性产物时，如不超出振幅特性工作门限范围，亦即有用信号功率值不高于临界值，则通路非线性杂音功率值可用上述方程式计算。

当通路传输不同速率的数字信号（如早已传输的音频电报）时，群路瞬间过负荷比计算均匀非线性杂音的影响更坏。因为方程式必须在振幅特性工作区域内才成立，过负荷时则破坏了此函数关系，造成非线性失真迅速增加。在此条件下，使用公式（1）已不能忽略高次项的成分了。

在具有深负反馈的放大器中，过负荷门限实际上限制了有用信号的输出电压，以消除群路信号中的瞬时电压峰值所引起发送放大器过负荷而产生的瞬间干扰脉冲。因为当做为

二元码通路传输脉冲信号时，就会受到此种干扰脉冲的串扰，它的频带分布很宽，完全可落在一个通路中。干扰频率决定于群路过负荷的程度及二元码的传输速率。

在放大信号时，放大器的失真和群路瞬间过负荷所引起的非线性失真过程是相同的。分析非线性对通信质量的影响时，必须把非线性分成不同的两个部分。这样，当传送语言信号时，群路瞬时过负荷所引起少量的非线性对通信质量的影响可以忽略，因为听觉系统对瞬间干扰作用的感觉不灵敏。在这种情况下，非线性产物很小，并限定用至公式(1)的三次项，所求的非线性杂音平均功率值决定于公式(1)中的系数和放大器输出端有用信号的平均功率值。

在通路传输二元码的情况下，计算非线性产物对误码率的影响，可看成是均匀非线性杂音的平均功率造成数字信号边缘失真的原因之一。

这里主要的影响是群路瞬间过负荷，因为均匀非线性杂音功率比过负荷引起的脉冲干扰功率小。在这种情况下，非线性产物可认为是由于切去放大器过负荷门限以外的群路信号瞬时电压峰值而引起的。决定脉冲干扰能量时，应考虑群放大过负荷的延续时间、通路的频宽和通路在外线频谱的位置。

第一章 语言信号的基本特性

传输语言的电信号叫做语言信号。语言信号具有高度信息量。它除了能听懂信息外，还要具有说话音量、音色的特点和能判别说话音调的特征。在音频 (ТЧ) 通路系统中，使用频分制 (ЧД) 传输语言信号，为了实现传输语言质量的综合要求——清晰度、声响度及自然度——必须计算该系统的通路和群路负荷。

语言信号是随机的，用此信号来研究通路过负荷的问题，应计算其统计特性。在此情况下，信号的瞬时电压和功率的变化过程使我们很感兴趣。

1.1 定 义

语言的基本特性决定于负荷，它包括频率范围、频谱特性、振幅成分、动态幅度及峰值因数。

语言的频率范围，决定于组成全部语言的频率成分，一般认为其频率范围自100~10000赫。因为语言的主要成分在300~3400赫，故只接收这段频带的语言，已有足够的明了度；这段频带叫做音频通路的有效传输频带 (ЭППЧ)。

语言的频谱特性，是语言频谱的平均电平与频率的关系。在俄语总声压为97.5分贝时，这关系曲线如图1—1所示，并详见参考资料[30]。音频通路输入端所输入语言信号的频率特性与采用的送话器型号有关，故实际上的特性与图1—1有所不同。

语言的振幅成分，决定于语言电平的概率分布。如果将语

言信号划分成若干频段（例如10段），并测量其中每一个语言振幅成分，分析各段关系几乎相同，可认为语言信号及其频谱内的所有区段都按平均电平来变化。根据语言振幅成分可决定动态幅度及峰值因数。

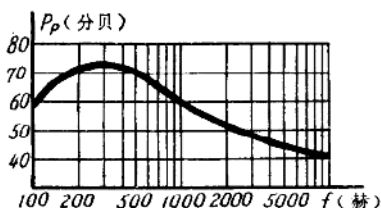


图 1-1

语言动态幅度是电平的最大值与最小值之差，约等于50分贝，实际上它与语言频率成分无关。因此，为了传输语言，通路应能适应充分大的振幅，直至限幅为止。

语言最大电平与平均电平的差值叫做峰值因数。语言在不同频谱区域中，峰值因数几乎不变。当其概率超过0.01时，它约为12分贝；当其概率超过0.001时，它约为16分贝。

为了分析群路传输语言信号，便引进有效通路这个概念。计算电话有效通路时，通路连续传输语言信号，它在音节间及单词间停顿的延续时间，应不超过350毫秒。标准语言各个声响停顿时间为20~350毫秒，语言发音平均速度为每秒12~15个声响，且平均相对停息时间约占连续谈话时间的16%。

语言信号的瞬时值用随机过程表示，依赖于：音响、说话人的嗓子、送话器的电特性、峰值电流量、用户线的长度和型号，以及其它因素。若通信系统的工作条件不变，并分析有效通路接收间隔的信号，可认为语言信号是各态历经的平稳随机过程。在这种情况下，语言信号的基本统计参数之一是方差，它等于分配在1欧负荷上的语言信号平均功率。

对语言信号的平均功率，可理解为有效通路信号的时间平均功率。采用语言信号的平均功率与1毫瓦之比的对数来

1110546

表示音量单位。其定义为

$$P = 10 \lg \frac{P(\text{毫瓦})}{1(\text{毫瓦})} \text{分贝} \quad (1-1)$$

式中 P ——有效电话通路输入端的语言信号平均功率。

电压的均方值象随机过程的统计参数一样等于语言信号的平均有效电压值。在此情况下，通路有效状态的时间也是平均时间。

语言信号的瞬时电压及瞬时功率，通常称为有效电压及有效功率，在极小一段时间内，信号随时间的增大可认为是均匀的。

1.2 概率密度函数与分布函数

现在提出关于标准语言信号瞬时电压值概率分布的几个公式，见参考资料[33]及[46]。这些表达式中的大多数是假设在语言信号结构方面的电声影响很小的情况下得到的。同时，这些分布函数的类型与用户送话器的型号有关。

频分制多路系统电话通路中传送语言信号瞬时电压概率分布曲线的函数，可采用尤拉（Euler）第二型积分公式

$$\Gamma(\varepsilon) = \int_0^{\infty} \frac{k^{\varepsilon}}{u_{\phi\phi}^{\varepsilon}} u^{\varepsilon-1} e^{-\frac{k}{u_{\phi\phi}} u} du \quad (1-2)$$

式中 $\Gamma(\varepsilon)$ —— ε 的伽马函数；

u ——语言信号的瞬时电压值；

$u_{\phi\phi}$ ——实际用户语言信号的有效电压值；

k 及 ε ——语言信号的特性参数。

由于随机变量的全部概率应该等于1，由公式(1-2)可得

$$\int_0^{\infty} \frac{k^{\varepsilon}}{\Gamma(\varepsilon) u_{\phi\phi}^{\varepsilon}} u^{\varepsilon-1} e^{-\frac{k}{u_{\phi\phi}} u} du = 1 \quad (1-3)$$

在此情况下，作为随机变量的语言信号电压的方差为

$$\int_0^{\infty} \frac{k^{\varepsilon}}{\Gamma(\varepsilon) u_{\phi\phi}^{\varepsilon}} u^{\varepsilon-1} e^{-\frac{k}{u_{\phi\phi}} u} u^2 du = u_{\phi\phi}^2 \quad (1-4)$$

由积分可得

$$\frac{\Gamma(\varepsilon+2) u_{\phi\phi}^2}{\Gamma(\varepsilon) k^2} = \frac{(\varepsilon+1) \varepsilon u_{\phi\phi}^2}{k^2} = u_{\phi\phi}^2$$

由此可得 k 与 ε 的关系为

$$k = \sqrt{\varepsilon(\varepsilon+1)} \quad (1-5)$$

利用公式 (1-3) 及 (1-4)，语言信号瞬时电压及标准电压概率分布的密度函数分别如下，详见参考资料[46]：

$$f(u) = \frac{k^{\varepsilon}}{2\Gamma(\varepsilon) u_{\phi\phi}^{\varepsilon}} |u|^{\varepsilon-1} e^{-\frac{k}{u_{\phi\phi}} u} \quad (1-6)$$

$$f(x) = \frac{k^{\varepsilon}}{2\Gamma(\varepsilon)} x^{\varepsilon-1} e^{-kx} \quad (1-7)$$

式中

$$x = \frac{|u|}{u_{\phi\phi}}$$

在计算时，由于语言信号瞬时电压的分布以零对称，因此公式 (1-6) 及 (1-7) 只是分布曲线的一支。

公式 (1-6) 及 (1-7) 中的参数 ε 值，可确定如下：由于语言信号峰值因数常用概率超过 0.001 来计算，故公式 (1-7) 又可写成为如下方程：

$$2 \int_{x_0}^{\infty} \frac{k}{2\Gamma(\varepsilon)} (kx)^{\varepsilon-1} e^{-kx} dx = 0.001 \quad (1-8)$$

式中 x_0 ——在概率超过 0.001 时，该电话设备输出端语言信号的峰值因数。

应用分部积分方法若干次，公式 (1-8) 可用渐近级

数表示如下:

$$\begin{aligned} \int_{x_0}^{\infty} \frac{k}{\Gamma(\varepsilon)} (kx)^{\varepsilon-1} e^{-kx} dx &= \frac{k^{\varepsilon}}{\Gamma(\varepsilon)} \int_{x_0}^{\infty} x^{\varepsilon-1} e^{-kx} dx \\ &= \frac{1}{\Gamma(\varepsilon) e^{kx_0}} \left[\frac{1}{(kx_0)^{1-\varepsilon}} + \frac{\varepsilon-1}{(kx_0)^{2-\varepsilon}} \right. \\ &\quad \left. + \frac{(\varepsilon-1)(\varepsilon-2)}{(kx_0)^{3-\varepsilon}} + \dots + \frac{(\varepsilon-1)(\varepsilon-2)\dots(\varepsilon-n+1)}{(kx_0)^{n-\varepsilon}} \right] \end{aligned}$$

结果公式 (1-8) 可写成下式:

$$\begin{aligned} &\frac{1}{\Gamma(\varepsilon) e^{kx_0}} \left[\frac{1}{(kx_0)^{1-\varepsilon}} + \frac{\varepsilon-1}{(kx_0)^{2-\varepsilon}} \right. \\ &\quad \left. + \frac{(\varepsilon-1)(\varepsilon-2)}{(kx_0)^{3-\varepsilon}} + \dots + \frac{(\varepsilon-1)(\varepsilon-2)\dots(\varepsilon-n+1)}{(kx_0)^{n-\varepsilon}} \right] \\ &= 0.001 \end{aligned} \quad (1-9)$$

考虑发散渐近式性质, 所得级数可用于近似计算。当 $\varepsilon < 1$ 时, 级数是收敛的交错级数。当 x 值增大时, 级数迅速减小。选用级数的前几项之和, 解所得方程, 便可求出参数 ε 值。

电话设备输出端语言信号的峰值因数, 在概率超过 0.001 时, 其值约等于 16 分贝。这时, $x_0 = 10^{0.3} = 6.3$; 当 $\varepsilon = 0.5$ 时, 公式 (1-9) 具有足够的精确度。

语言信号瞬时电压及标准电压概率分布函数可分别如下:

$$F(u) = 0.5 + \int_0^u \frac{k^{\varepsilon}}{2\Gamma(\varepsilon) u^{\varepsilon-\phi}} |u|^{\varepsilon-1} e^{-\frac{k}{2\phi} |u|} du \quad (1-10)$$

$$F(x) = 0.5 + \int_0^x \frac{k^{\varepsilon}}{2\Gamma(\varepsilon)} x^{\varepsilon-1} e^{-kx} dx \quad (1-11)$$

这样, 语言信号瞬时电压及标准电压概率密度函数及分布函数可用公式 (1-6)、(1-7)、(1-10) 及 (1-11) 来表示。语言信号的结构与电话设备送话器的特性有关。这

个关系可由参数 ε 利用公式(1—6)、(1—7)、(1—10)及(1—11)进行计算。参数 ε 的数值根据已知的概率和信号的峰值因数,可以由公式(1—9)求出。

1.3 语言信号分布的矩及半不变量

语言信号是随机过程,其统计特性要引用概率理论中的矩概念。

语言信号瞬时电压数学期望值是分布函数的一阶原点矩,它决定该信号的直流成分。由于语言信号变频及传输时,要经过变量器去掉直流成分,因此一阶原点矩等于零。由语言信号的原点矩和中心矩的概念可知,两个矩是彼此相同的。以后,所述的“矩”即指中心矩。

从第三阶开始的奇数阶的矩,决定随机分布函数的不对称的特性。语言信号电压的正值及负值,通常认为是对称于零的。因此,语言信号瞬时电压分布函数的第三阶矩及全部第三阶以上奇数阶矩等于零。

随机变量分布函数偶数阶的矩决定该变量对于数学期望值的离散程度。故偶数阶矩——特别第二阶矩,通常被叫做方差。语言信号瞬时电压的分布函数的第四阶矩,决定其分布曲线与正态分布曲线相比较,是尖顶的还是平顶的。

利用公式(1—6),可确定语言信号瞬时电压分布函数中任何偶数阶的矩如下:

$$M_{2n} = \int_0^{\infty} \frac{k^{\varepsilon}}{\Gamma(\varepsilon) u_{\phi\phi}^{\varepsilon}} |u|^{2n + (\varepsilon - 1)} e^{-\frac{h}{u_{\phi\phi}} |u|} du$$

省略中间的演算过程,最后得

$$M_{2n} = \frac{\Gamma(2n + \varepsilon) u_{\phi\phi}^{2n}}{\Gamma(\varepsilon) k^{2n}} \quad (1-12)$$

语言信号任何偶数阶标准矩由下式决定:

$$M_{2n} = \frac{\Gamma(2n + \varepsilon)}{\Gamma(\varepsilon) k^{2n}} \quad (1-13)$$

其中，第二阶标准矩总是等于1。第四阶标准矩，当 $\varepsilon=0.5$ 时，由公式(1-13)等于

$$M_{4n} = \frac{M_4}{M_2^2} = \frac{\Gamma(4 + \varepsilon)}{\Gamma(\varepsilon) k^4} = 11.6$$

这样，语言信号任何阶的矩都可进行计算。通过实验，可比较精确地决定，语言信号统计特性与所用的电话设备送话器有关，即参数 ε 的数值不同。为了决定语言信号第二阶的矩，可利用具有平方律检波的仪器进行测试。其第四阶的矩，也可借助于专门仪器实验求得。

和数理统计一样，在计算语言信号统计特性时，只研究前四阶矩，但可由公式(1-12)和(1-13)来计算其高阶矩。

概率分布特性除了矩以外，还可采用半不变量特性。它与矩的关系见参考资料[16]，由第一阶算至第六阶（包括第六阶在内），可由下列等式决定：

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= M_1; & x_2 &= M_2; & x_3 &= M_3; & x_4 &= M_4 - 3M_2^2; \\ x_5 &= M_5 - 10M_2M_3; & x_6 &= M_6 - 15M_2M_4 + 30M_2^3 \end{aligned} \right\} \quad (1-14)$$

式中 $x_1 \sim x_6$ ——第一阶至第六阶的半不变量；

$M_1 \sim M_6$ ——第一阶至第六阶的矩。

各标准的半不变量决定于下列等式：

$$\left. \begin{aligned} x_{1n} &= \frac{x_1}{\sqrt{M_2}} = M_{1n}; & x_{2n} &= \frac{x_2}{M_2} = 1; \\ x_{3n} &= \frac{x_3}{(\sqrt{M_2})^3} = M_{3n}; & x_{4n} &= \frac{x_4}{M_2^2} = M_{4n} - 3; \\ x_{5n} &= \frac{x_5}{(\sqrt{M_2})^5} = M_{5n} - 10M_{3n}; \\ x_{6n} &= \frac{x_6}{M_2^3} = M_{6n} - 15M_{4n} + 30 \end{aligned} \right\} \quad (1-15)$$

第三阶及第四阶标准半不变量，分别叫做不对称系数及超越系数。不对称系数（如第三阶矩）不为零，就证明了概率分布关于数学期望值的不对称性。

超越系数决定随机变量概率分布密度曲线与正态分布密度曲线比较时的尖度。当超越系数为正值（即 $x_{4s} > 0$ ）时，概率分布曲线比正态分布曲线更尖；当超越系数为负值时，它比正态分布曲线更平。对语言信号来说， $x_1 = x_3 = 0$ 。语言信号超越系数，当 $\varepsilon = 0.5$ 时，由公式(1—13)及(1—15)可得 $x_{4s} = 11.6 - 3 = 8.6$ 。因此，语言信号分布曲线比正态分布曲线更尖。

语言信号超越系数的值，决定了在有效通路时间连续平稳各态历经过程。严格地说，语言信号超越系数不是常数。它与说话人嗓子特征、电话设备型式、送话器特性及其它因素有关。这些关系可计算在频分制多路系统中的通路及群路负荷因数之内。在实际工程中，这些都可做附加标准来估算送话器及电话设备的特性。