

· 孙玉院士技术全集 ·

中国工程院院士文集

数字网传输损伤

◎ 孙 玉 编著

孙玉
著



中国工信出版集团



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

· 孙玉院士技术全集 ·

中國工程院 院士文集



数字网传输损伤

◎ 孙 玉 编著



人民邮电出版社
北 京

图书在版编目 (C I P) 数据

数字网传输损伤 / 孙玉编著. — 北京 : 人民邮电出版社, 2017.9

(孙玉院士技术全集)

ISBN 978-7-115-44676-3

I. ①数… II. ①孙… III. ①数字传输系统—研究
IV. ①TN919.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第232018号

内 容 提 要

本书从数字通信网全网传输质量观点出发,集中讨论了数字连接的全程传输损伤,即从定义、产生、影响、特性、积累、分配、控制、测量以及国际电报电话咨询委员会(CCITT)相应建议等方面,讨论误码、抖动、漂移、滑动、延时及帧失步等各项数字传输损伤。

本书可以作为从事数字通信网规划、设计及维护的专业人员的参考用书,也可供高等院校通信专业师生阅读。

◆ 编 著 孙 玉

责任编辑 杨 凌

责任印制 彭志环

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路 11 号

邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn

网址 <http://www.ptpress.com.cn>

北京天宇星印刷厂印刷

◆ 开本: 700×1000 1/16

彩插: 1

印张: 17.75

2017 年 9 月第 1 版

字数: 307 千字

2017 年 9 月北京第 1 次印刷

定价: 108.00 元

读者服务热线: (010) 81055488 印装质量热线: (010) 81055316

反盗版热线: (010) 81055315



孙玉

1962年毕业于清华大学，后被分配到中国电子科技集团第54研究所工作至今。其间，从事军事通信设备研制和通信系统总体工程设计；领导创建了电信网络专业和数字家庭专业；出版电信科技著作13部。1995年当选中国工程院院士。现任，国防电信网络重点实验室科技委主任；兼任，中央军委科技委顾问。

《中国工程院院士文集》总序

二〇一二年暮秋，中国工程院开始组织并陆续出版《中国工程院院士文集》系列丛书。《中国工程院院士文集》收录了院士的传略、学术论文、中外论文及其目录、讲话文稿与科普作品等。其中，既有早年初涉工程科技领域的学术论文，亦有成为学科领军人物后，学术观点日趋成熟的思想硕果。卷卷《文集》在手，众多院士数十载辛勤耕耘的学术人生跃然纸上，透过严谨的工程科技论文，院士笑谈宏论的生动形象历历在目。

中国工程院是中国工程科学技术界的最高荣誉性、咨询性学术机构，由院士组成，致力于促进工程科学技术事业的发展。作为工程科学技术方面的领军人物，院士们在各自的研究领域具有极高的学术造诣，为我国工程科技事业发展做出了重大的、创造性的成就和贡献。《中国工程院院士文集》既是院士们一生事业成果的凝练，也是他们高尚人格情操的写照。工程院出版史上能够留下这样丰富深刻的一笔，余有荣焉。

我向来以为，为中国工程院院士们组织出版《院士文集》之意义，贵在“真善美”三字。他们脚踏实地，放眼未来，自朴实的工程技术升华至引领学术前沿的至高境界，此谓其“真”；他们热爱祖国，提携后进，具有坚定的理想信念和高尚的人格魅力，此谓其“善”；他们治学严谨，著作等身，求真务实，科学创新，此谓其“美”。《院士文集》集真善美于一体，辩而不华，质而不俚，既有“居高声自远”之澹泊意蕴，又有“大济于苍生”之战略胸怀，斯人斯事，斯情斯志，令人阅后难忘。

读一本文集，犹如阅读一段院士的“攀登”高峰的人生。让我们翻

开《中国工程院院士文集》，进入院士们的学术世界。愿后之览者，亦有感于斯文，体味院士们的学术历程。

徐匡迪

二〇一二年

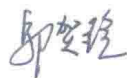
全集序言

20 世纪 70 年代后期，我国的通信网开始模/数转换，当时国内自行研制的 PCM 基群设备和二次群数字复接设备先于国外引进的产品在国内试验并应用，打破了国外的技术封锁。我与孙院士相识也是从那时开始，孙院士在这之前就成功主持了我国第一代散射数字传输系统和第一套 PDH 数字复接设备的研制，我当时负责 PCM 基群复用设备的研制和试验。PCM 基群与 PDH 数字复接设备分属一次群与二次群，在网络上 是上下游的关系，我们连续几年一起参加国际电信联盟（ITU）数字网研究组的标准化会议，后来在各自的工作中又有不少的联系，从中了解了他的学识，也学习了他的做人准则。他在通信工程方面有非常丰富的经验，他对通信网的理解、对通信标准的掌握和治学精神的严谨一直为 我所敬佩，他勤于思考和积极探索，善于总结和举一反三，乐于海人和提携后进，与他共事受益不浅。在这之后他又相继研制成功数字用户程控交换机、ISDN 交换机、B-ISDN 交换机及相应的试验网，还主持研制成功接入网和用户驻地网网络平台，并将上述成果应用到专用通信网和民用通信工程中，很多研发工作都是国内首次完成。

孙玉院士将研发体会写成著作交由人民邮电出版社出版，他的著作如同他的科技成果一样丰硕，从 20 世纪 80 年代初的《数字复接技术》一书开始，陆续出版了《数字网传输损伤》、*PDH for Telecommunications Network*、《数字网专用技术》《电信网络总体概念讨论》《电信网络安全总体防卫讨论》《应急通信技术总体框架讨论》《数字家庭网络总体技术》《电信网络中的数字方法》和《孙玉院士技术报告文集》，其中《数字复接技术》与《数字网传输损伤》两本书还都出了修订本。这些论著所涉及的领域或视角在当时为国内首次出版。他鼓励我将科研成果也写成书

出版，既可将宝贵的经验与同行共享，也是自身对专业认识的深化过程。我写过一本书，深感要写出自己满意且读者认可的书非要下苦功不可。孙玉院士难能可贵的是笔耕三十年，著作十余本，网聚新技术，敢为世人先。这一系列专著覆盖了电信网的诸多方面，每一本既独立成书但又彼此关联，虽然时间跨度几十年，但就像一气呵成那样连贯，这些著作体现了他的一贯风格，概念清晰准确，思路层次分明，理论与实践结合，解读深入浅出。这些论著在写作上以电信网系统工程为主线，突出了总体设计思想和方法，既有严格的电信标准规范，又有创新性的解决方案，学术思想寓于工程应用中，兼具知识性与实用性，不论是对电信工程师还是相关专业的高校师生都不无裨益，在我国电信网的建设中发挥了重要作用。电信网技术演进很快，但这一系列著作所论述的设计思想及方法论对今后网络发展的认识仍有很好的指导意义，人民邮电出版社提议出版孙玉院士著作全集，更便于广大读者对电信网全局和系统性的了解，这是电信界的一件好事，并得到了中国工程院院士文集出版工作的大力支持，我期待这一全集的隆重问世。

中国工程院院士



2017 年 6 月于北京

全集出版前言

1962—1995 年期间，我在科研生产第一线，有幸参加了我国电信技术数字化的全过程。其间根据科研工作进程的需要，也是创建电信网络专业的需要，我逐年编写并出版了一些著作。

1. 专著《数字复接技术》，人民邮电出版社出版，1983 年第一版；1991 年修订版；1994 年翻译版 *PDH for Telecommunication Network*, IPC.Graphics.U.S.A。这是我 1970—1980 年期间，从事复接技术研究的工作总结。其中提出了准同步数字体系（PDH）数字复用设备的国际通用工程设计方法。令我欣慰的是，这本书居然存活了十余年，创造并保持着人民邮电出版社科技专著销量纪录，让我在我国电信技术界建立了广泛的友谊。

2. 编著《数字网传输损伤》，人民邮电出版社出版，1985 年第一版；1991 年修订版。这是我 1970—1980 年期间，出于电信网络总体工程设计需要，参考国际电信联盟（ITU）文献，编写的工具书。为了便于应用，其中澄清了一些有关传输损伤的基本概念。

3. 编著《数字网专用技术》，人民邮电出版社 1988 年出版。这是为我的硕士研究生们编写的专业科普图书，介绍了一些当时出现不久的技术概念和原理。显然，无技术水平可言。

1995 年之后，我退居科研生产第二线，转入技术支持工作。其间，根据当时的技术问题，以及培育学生和理论研究的需要，我逐年编写并出版了一些著作。

4. 编著《数字家庭网络总体技术》，电子工业出版社 2007 年出版。这是我 2006—2009 年期间，受聘国家数字家庭应用示范产业基地（广州）技术顾问，为广州基地编写的培训教材。其中提出了数字家庭第二代产

业目标——家庭网络平台和多业务系统，被基地和工信部接受。

5. 专著《电信网络总体概念讨论》，人民邮电出版社 2008 年出版。这是我 2005—2008 年期间，从事电信网络机理研究的总结。在我从事电信科研 30 多年之后发现，电信网络技术作为已经存在 160 多年、支撑着遍布全球电信网络的基础技术，居然尚未澄清电信网络机理，充满了概念混淆。我试图讨论这些问题。其中，澄清了电信网络的形成背景；电信网络技术分类；电信网络机理分类及其属性分析。但是，当我得出电信网络资源利用效率的数学结论时，竟然与我的物理常识大相径庭。为此，我在全国知名电信学府和研究院所做了 50 多场讲座，主要目的是请同行指点我的理论是否有误。这是我的代表著作，令我遗憾的是，这是一本未竟之作。书名称为“讨论”，是期盼后生能够接着讨论这个问题。

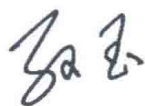
6. 编著《电信网络安全总体防卫讨论》，人民邮电出版社 2008 年出版。这是 2004—2005 年期间，我在国务院信息办参加解决“非法插播和电话骚扰问题”时编写的总结报告，经批准出版。其中提出了网络安全概念；建议主管部门不要再利用通信卫星广播电视信号；建议国家发射广播卫星；建议国家建设信源定位系统。这本书曾经令同行误认为我懂得网络安全。其实，我仅仅经历了半年时间，参与解决上述特定问题。

7. 编著《应急通信技术总体框架讨论》，人民邮电出版社 2009 年出版。这是 2008—2009 年期间，在汶川地震前后，我参加国家应急通信技术研究时编写的技术报告。希望澄清应急通信总体概念，然后开展科研工作。可惜，我未能参与后续的工作。

8. 编著《电信网络技术中的数学方法》，人民邮电出版社 2017 年出版。我国电信界普遍认为，在电信技术中应用数学方法非常困难，同时，也看到一旦利用数学方法解决了问题，就会取得明显的工程效果。2009 年我曾建议人民邮电出版社出版《电信技术中的数学方法丛书》。所幸，一经提出就得到了人民邮电出版社和电信同仁的广泛支持。本书作为这套丛书的“靶书”，仅供同行讨论，以寻求编写这套丛书的规范。我认为数学方法对于电信技术的发展和人才的培养具有特殊的意义，我期待着这套丛书出版。

9. 编著《孙玉院士技术报告文集》，人民邮电出版社 2017 年出版。这是我历年技术报告的代表性文本，其中，主要是近年来关于研制和推广应用物联网的相关报告。这些报告多数属于科普报告，主要反映了我对于我国国民经济信息化的期望。

上述著作，出版时间跨越整整 34 年，电信科技内容覆盖了我 50 多年的科研历程。可见，这几本书基本上是一叠陈年旧账。然而，人民邮电出版社决定出版这套全集，也许，他们认为，这套全集大体上能够从电信技术出版业角度，反映出我国电信技术的发展历程；反映出我们这一代电信工程师的工作经历；同时，也反映了与我们同代的电信科技书刊编辑们的奉献。也许，他们认为，作为高技术中的基础学科，电信技术的某些理论和技术成就仍然起着支撑和指导作用。如实而言，不难发现，在我国现实、大量信息系统工程设计中，涉及信息基础设施（电信网络）设计，普遍存在概念性、技术性、机理性甚至常识性错误。我们国家已经走过生存、发展历程，正在走向强大。在我国电信领域，不仅需要加强技术研究（如“863”计划），而且需要加强理论研究（如“973”计划）。期待我国年轻的电信科技精英们，特别是年轻有为的院士们，能够编撰出更好、更多的电信科技著作。



2017 年 6 月于中国电子科技集团公司第 54 研究所

再 版 前 言

本书原版脱稿于 1984 年，时至今日已逾六年。在此期间，影响本书内容的重要演变主要体现在以下两个方面。

1. 我国建设了不少数字长途线路，并且还在继续建设。这些工程一方面使更多的技术人员需要有关数字传输损伤的知识，另一方面也充实了相应的测量数据与技术内容。

2. CCITT 有关数字传输损伤的研究与建议更为完善。如果说 1979—1983 年为数字传输损伤的研究与建议奠定了基础，那么 1984—1988 年，相应的研究与建议已经大体成熟，即除个别的概念与规范尚待深入研究之外，绝大多数有关建议已臻于完善。

本书作为关于数字传输损伤的专门技术基础书，有必要纳入这些新的技术内容。此外，本书自出版以来，发现了不少错误和不妥之处，因此，本书再版时做了较大的修改与补充。邮电部传输所邓忠礼同志对“误码”一章做了详细审核并提出了重要修改意见。在此顺致谢意！



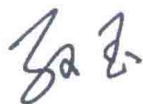
1990 年 4 月 14 日
于石家庄通信测控技术研究所

初 版 前 言

近年来，国内外关于数字网研究与试验的步伐明显地加快了。国内民用、军用及企业专用数字网陆续开始规划，有的已经建设到有相当的规模。这些工程规划与工程建设向数字网总体设计和技术研究部门提出一系列技术疑难问题。其中绝大部分涉及如何确定数字网的各种传输损伤这类基础课题。国际上关于数字网研究与建设已经积累了相当丰富的经验。在此基础上，国际电报电话咨询委员会（CCITT）关于数字网传输损伤（Transmission Impairments in Digital Networks）规范做了大量研究工作，并且提出了相当完善的建议。笔者于 1977—1983 年间参与了 CCITT 第 XVIII 研究组（数字网）的工作，感到有责任把这些建议的内容写成比较完整、简明的材料，供我国从事数字网研究与建设的同仁参考。

本书从数字网全网质量观点出发，集中讨论数字连接的全程传输损伤。一般是先简明扼要地介绍理论基础，再说明国际建议，以便读者理解，并能从中得到较系统、较完整并有工程实用意义的概念。全书共分七章。第一章介绍各项传输损伤的基本概念、度量方法、相互传递关系以及规定这些损伤项目的通用方法；第二章到第七章分别从定义、产生、影响、特性、积累、分配、控制、测量以及 CCITT 建议等方面，讨论误码、抖动、漂移、滑动、延时及帧失步等各项数字传输损伤。技术水准与损伤规范总是相互影响的。技术水准是确定损伤规范的基础，而损伤规范又推动着技术的发展。现有的科技专著通常是按技术内容分类的，例如：编码技术、数字传输、数字复接、数字交换等。这类专著主要讲技术原理，而损伤规范在其中居次要地位。本书则主要讲损伤规范，将其具体实现技术放在次要地位。采用这种不同写法之目的在于突出损伤规范，侧重满足数字网总体设计和工程建设工作的需要。

笔者编写本书，是以目前可能查到的经典文献、1977—1984 年 CCITT 数字网研究组有关资料以及笔者所在单位关于数字网研究的一些结果为依据的。本书初稿经李琳同志审阅，提出了很多宝贵意见，并做了几处重要的更改，谨在此致谢。



于石家庄通信研究所
1984 年 4 月 14 日

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 数字网及其承担的业务	1
1.2 数字连接及传输损伤	2
1.3 数字传输性能指标	5
1.4 数字传输损伤传递	8
1.5 数字传输模型	11
参考文献	14
第 2 章 误码	16
2.1 引言	16
2.2 误码的定义	16
2.3 误码的产生	17
2.4 误码增殖	21
2.5 误码影响	25
2.6 误码度量	29
2.7 <i>BER</i> 与 <i>EFS</i> 的取值	32
2.8 误码分布	35
2.9 误字率	44
2.10 误码积累	49
2.11 群间误码传递	51
2.12 误码抑制和误码控制	56
2.13 误码分配	60
2.14 误码测量与监视	62
2.15 微波链路误码测量示例	67
2.16 CCITT 关于误码的建议	78
参考文献	84
第 3 章 抖动	87
3.1 抖动的概念	87

3.2	数字传输设备抖动的产生	89
3.3	数字段的抖动积累	95
3.4	数字复接器的抖动产生	100
3.5	塞入抖动积累	109
3.6	数字链路的抖动积累	115
3.7	抖动的影响	118
3.8	抖动抑制	123
3.9	数字网的抖动规范	129
3.10	抖动测量	133
3.11	微波链路抖动测量示例	148
3.12	CCITT 关于抖动的建议	150
	参考文献	162
第 4 章	漂移和滑动	164
4.1	漂移概念	164
4.2	数字传输系统的漂移	165
4.3	局钟系统的漂移	168
4.4	准同步复接的漂移	172
4.5	漂移积累	173
4.6	漂移的影响	177
4.7	漂移的对策	178
4.8	滑动的概念	180
4.9	滑动的产生	181
4.10	漂移—受控滑动转化	184
4.11	滑动控制滞后	187
4.12	滑动的影响	191
4.13	滑动性能指标	192
4.14	受控滑动指标及其分配	195
4.15	漂移/滑动测量	197
4.16	链路滑动速率及时钟精度分配	199
4.17	CCITT 关于滑动的建议	202
	参考文献	205
第 5 章	帧失步	207
5.1	帧失步概念	207
5.2	第一类帧失步原因	208

5.3 第一类误码帧失步	210
5.4 第一类滑动帧失步	216
5.5 第二类帧失步原因	219
5.6 第二类虚警帧失步	220
5.7 第二类滑动帧失步	224
5.8 第三类帧失步原因	224
5.9 第三类虚警帧失步	225
5.10 第三类滑动帧失步	231
5.11 帧失步扩散	232
5.12 帧失步的影响	234
5.13 减少帧失步的方法	234
5.14 帧失步测量	239
5.15 帧失步规范	242
参考文献	242
第 6 章 延时	244
6.1 延时问题	244
6.2 群延时	244
6.3 传输系统产生的延时	247
6.4 数字设备产生的延时	250
6.5 延时的影响	253
6.6 延时分类	254
6.7 对回波/延时的限制	255
6.8 回波抑制与回波抵消	258
6.9 CCITT 关于延时的建议	261
参考文献	264
全集出版后记	265

第1章 概 述

1.1 数字网及其承担的业务

众所周知,通信网分为模拟通信网和数字通信网两类。早期建设的并且现在主要使用的是模拟通信网;近期发展起来的并且可能取代模拟通信网的是**数字通信网**,后者简称**数字网 (digital network)**。这两类通信网的网络结构类似,但采用的技术则截然不同。至于两类通信网可能承担的业务,似乎没有差别,它们都能承担各种话音业务和非话音业务,但是二者在承担各种业务时,可能提供的技术性能及需要付出的经济代价却有很大差异。从目前技术发展的趋势来看,这种差异将越来越大。这也就是数字通信网能逐步取代模拟通信网的主要原因。

数字网是指采用综合数字传输和数字交换技术以使两点或多点之间进行通信或提供其他可能功能的数字连接的**数字节点**和**数字链路**的集合。这个定义含有三层意思:它说明数字网是由数字连接的数字节点和数字链路构成的;又说明数字网所采用的基本设备或基本技术是综合数字传输和数字交换;还说明数字网能为两点或多点之间提供通信和可能的其他功能。

数字网为两点或多点之间提供服务总是通过具体的数字连接来实现的。一般说来可以采取交换连接(包括半固定连接方式)或者非交换连接(即固定连接方式)来建立这种连接。在本书讨论传输损伤时,是假定已经建立了数字连接,而无需考虑具体建立连接的方法。一个简单的数字连接的例子示意图 1-1。一般说来,两个用户之间或者两个标准 64kbit/s 基本接口之间,通常要经历数字交换,数字复接及数字传输等各个基本环节。在数字连接中流动着多种信息流参见图 1-2。数字传输系统的发端与收端之间流通着传输同步信号(或称比特同步信号);数字复接系统的复接器与分接器之间流通着复接同步信号(或称帧同步信号);数字交换机内的帧调整器之间流通着交换同步信号(或称网同步信号);数字交换机内的控制机之间流通着交换信令。上述 5 种信号在数字连接中都是有起始点又有终点的。只有信码才贯穿整个数字连接的全程,即从用户出发经由数字交换机的接续网络、帧调整器以及数字复接器和数字传输