

(京)新登字 106 号

图书在版编目(CIP)数据

钢丝绳断丝定量检测原理与技术/杨叔子等著. —北京:
国防工业出版社, 1995. 7

ISBN 7-118-01404-4

I. 钢… II. 杨… III. 钢丝绳-损伤-无损检验-计算机
辅助测试 IV. TG356. 4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(94)第 15957 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

四季青印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 8 $\frac{3}{4}$ 205 千字

1995 年 7 月第 1 版 1995 年 7 月北京第 1 次印刷

印数: 1—2000 册 定价: 12.80 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技发展具有较大推动作用的专著;密切结合科技现代化和国防现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合科技现代化和国防现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。

4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承

担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版,随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技工业战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金

第二届评审委员会组成人员

名誉主任委员 怀国模

主任委员 黄 宁

副主任委员 殷鹤龄 高景德 陈芳允
曾 铎

秘 书 长 刘琯德

委 员 尤子平 朱森元 朵英贤
(按姓氏笔划为序) 刘 仁 何庆芝 何国伟
何新贵 宋家树 张汝果
范学虹 胡万忱 柯有安
侯 迁 侯正明 莫梧生
崔尔杰

前 言

1834 年,人们将古代用的缆发展为工业应用的钢丝绳。这之后,钢丝绳在煤炭、冶金、石油、林业、港口码头、建筑、旅游、桥梁建设等部门和行业中得到了广泛应用。电梯、索道、斜拉桥以及各种起重运输设备等是人们熟悉的钢丝绳应用实例。

钢丝绳使用的安全性是人们长期以来一直关心的问题。因钢丝绳断裂而产生的重大事故时有发生,且防不胜防。为确保使用中钢丝绳的安全运行,各国的科技人员一直致力于钢丝绳无损和破损检测的研究,并以无损检测研究最为活跃。从 1906 年南非研制出第一台钢丝绳电磁无损检测装置以来,人们已经用了 10 多种原理和方法对钢丝绳进行无损检测,其中,人工目视手摸检测方法是一种最原始的方法,但因其简单,目前仍被广泛采用;电磁无损检测方法则是当今公认最可靠而最易实现的检测方法。从钢丝绳管理与维护来看,绝大多数国家制定了钢丝绳安全使用规程,规定了钢丝绳报废时断丝根数、磨损、锈蚀等缺陷的定量指标,同时制定了严格的检查制度。尽管如此,钢丝绳断绳事故仍然难以杜绝。

就目前状况来看,钢丝绳的使用存在着三个方面的问题:其一,使用的安全性差。人工目视手摸检查方法受人为因素的影响大,且对钢丝绳内部不能检查,当钢丝绳表面存在油污时,检查困难,准确性、可靠性差,增加了事故发生的机率。其二,使用的经济性差。由于人工目视手摸检查的上述不足,很多单位采用定期更换钢丝绳的方法,按照每根钢丝绳额定的使用周期,到期不论其状况如何均予以报废,一方面使得潜在危险的钢丝绳仍然在使用;另一方面又将未使用到寿命期的钢丝绳提早报废。1984 年美国的一个统计资料表明:使用中的钢丝绳约 10%工作于危险状态,而 70%

左右被强制更换下来的钢丝绳又几乎没有强度损耗而被浪费。其三,检查效率低。人工目视手摸检查一般只能以小于 0.3m/s 的速度运行钢丝绳,而对于那些油泥较重的钢丝绳段清洗干净之后才能检查,且每班或每日需检查一次,这无疑会浪费很多用于生产的宝贵时间,降低了劳动生产率。当采用仪器对钢丝绳检查后,上述问题将会得到解决,但要求仪器具有对钢丝绳缺陷的定量而不是定性的检测性能。目前各国生产的钢丝绳检测仪均采用模拟信号处理方式,通过经验丰富或训练有素的检测人员诊断记录的检测信号,从而获得检测结果,很明显,因人为因素的影响,检测结果的准确性有限。因此,即使是目前公认较好的美国生产的 LMA 系列钢丝绳探伤仪,其也只能实现缺陷的定性或半定量的检测。基于计算机,采用信息处理技术,研制钢丝绳缺陷定量的识别仪器这一方法是可行的,也是势在必行的。

本专著重点论述了钢丝绳断丝的定量检测原理和实现技术,共分八章。第一章介绍了钢丝绳检测的意义、检测技术的产生和发展以及现有的检测方法与仪器。第二章简单介绍了钢丝绳的结构以及与检测相关的钢丝绳缺陷特征。第三章论述了钢丝绳的磁化问题,提出了钢丝绳磁化的方法和几种磁化装置结构,推导出了磁路计算公式。第四章论述了断丝漏磁场的检测原理与方法,建立了钢丝绳表面漏磁场和断丝漏磁场的分析计算模型,推导出了它们的计算公式,然后,提出三种断丝漏磁检测方法:基于多元件独立通道输出的检测方法、基于钢丝绳结构特征的霍尔元件阵列检测方法和聚磁检测方法,对霍尔元件特别是集成霍尔元件应用于钢丝绳检测中的特点进行了详细分析。第五章论述了断丝探伤传感器结构的设计,提出了随动定心的探头结构原理和系列化设计思想。第六章论述了计算机辅助检测系统的构成,提出了等空间间隔采样方法和检测系统性能评价指标,给出了霍尔元件和集成霍尔元件的模拟信号处理电路以及位移测量编码器的设计。第七章详细论述了检测信号在线定量识别方法,提出了基于检测信号特点的数字信号在线处理策略、干扰信号的剔除方法以及局部异常信

号的差分超限和峰峰值超限提取方法,在此基础上,提出了基于统计模式的断丝检测信号定量识别方法和基于模型的内部、外部断丝检测信号定量识别方法,第八章简要介绍了作者研制的三种钢丝绳检测仪原理、结构、性能指标、使用说明及其应用特点。

本书在集体讨论的基础上,由康宜华同志执笔,在卢文祥、李劲松、杨克冲、杜润生同志参与下,由我与康宜华同志定稿。本书有关成果是集体劳动和智慧的结晶,卢文祥、李劲松、杨克冲、杜润生、师汉民、王阳生、蔡建龙、叶兆国、刘克明、杨晓红、陈根林、丁忠平、胡阳、王峻峰、丁祖峻、黄锐、高红兵、孙迎、谈兵、薛鸿健、王贤江等同志参加了与本书有关的研究,特别是师汉民、王阳生、蔡建龙与叶兆国同志在 1985 年~1990 年期间的研究对本书作出了重要贡献。我还应着重指出,没有康宜华同志的长期一贯的研究工作、现场试验与实践以及与辛劳撰写工作,可以说,就没有这本书。

本书内容主要取自我们近 10 年来的理论、实验和应用研究的成果。这些研究工作得到国家自然科学基金委员会以及抚顺煤炭研究所、中国有色金属工业总公司南昌公司和赣州有色冶金研究所、大冶有色金属公司、武汉钢铁公司程潮铁矿、上海港务局等单位的支持、关心和帮助,在此表示衷心感谢。

本书的研究工作得到雷元勋高工、谢德珍高工、傅华新高工、丁嘉榆高工、汪贻水高工、刘春泉高工以及江西省小龙钨矿、江西省漂塘钨矿、大冶有色金属公司赤马山铜矿、浙江省建德铜矿、铜陵有色金属公司等单位的领导和工程技术人员的支持。本书的出版得到国防工业出版社,特别是邢海鹰同志的支持。作者对他们表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,错误在所难免,“嘤其鸣矣,求其友声”,衷心希望读者对书中的错误与不妥之处提出批评,予以指正,我们将不胜感激。

杨叔子*

1994 年 5 月 1 日

* 中国科学院院士,华中理工大学校长,教授、博士生导师。

目 录

第一章 绪 论

1.1 钢丝绳检测的意义	1
1.2 钢丝绳检测技术的产生和发展	5
1.3 钢丝绳缺陷检测方法与仪器	11

第二章 钢丝绳结构及其缺陷特征

2.1 钢丝绳结构	20
2.2 钢丝绳缺陷	23
2.3 钢丝绳检测标准	28

第三章 钢丝绳的磁化

3.1 磁化强度选择	31
3.2 磁化钢丝绳的方法	32
3.2.1 直流有源励磁	33
3.2.2 永磁励磁	34
3.3 永磁励磁回路中磁性材料的选择	35
3.3.1 永磁材料的选择	35
3.3.2 软磁材料的选择	36
3.4 励磁磁路结构分析	37
3.4.1 励磁磁路结构	38
3.4.2 δ 对磁导 G_0 的影响	39
3.4.3 δ 、 L_m 对极靴间漏磁场的影响	40
3.4.4 励磁磁路的实验结果	41
3.4.5 励磁磁路结构尺寸 δ 和 L_m 计算	43
3.5 单励磁回路结构设计及磁路计算	44
3.6 多励磁回路结构设计及磁路计算	53

3.7 励磁磁路的性能测试和检验方法	58
--------------------------	----

第四章 断丝漏磁场检测原理与方法

4.1 磁化段钢丝绳表面漏磁场分析	62
4.2 断丝断口漏磁场分析计算	65
4.2.1 单丝断口漏磁场	66
4.2.2 钢丝绳外部断丝断口漏磁场	71
4.2.3 钢丝绳内部断丝断口漏磁场	74
4.3 磁敏检测元件	79
4.4 单个霍尔元件检测断丝漏磁的特性参数	81
4.4.1 霍尔元件的轴向分辨力	81
4.4.2 霍尔元件检测断丝的信噪比	83
4.4.3 霍尔元件的周向覆盖范围	83
4.5 多元件独立通道检测方法	84
4.6 基于钢丝绳结构特征的霍尔元件阵列检测方法	86
4.6.1 股波信号对断丝检测的影响	87
4.6.2 钢丝绳结构及测点漏磁信号特征	89
4.6.3 霍尔元件列组合检测方法	93
4.6.4 霍尔元件阵列组合检测方法	97
4.7 聚磁检测原理与方法	99
4.7.1 霍尔元件对局部漏磁场的检测特点	100
4.7.2 聚磁检测原理	102
4.7.3 钢丝绳断丝漏磁检测聚磁器形状	108
4.7.4 聚磁环尺寸的选择	114

第五章 钢丝绳断丝探伤传感器设计

5.1 钢丝绳无损探伤传感器的性能指标	118
5.2 随动定心结构原理	121
5.3 单励磁回路的整体随动定心传感器结构	123
5.4 多回路励磁的夹持式传感器结构	124
5.5 探伤传感器的安装与安装支架	124
5.6 钢丝绳断丝探伤传感器系列设计	127

第六章 计算机辅助检测系统

6.1 计算机辅助检测系统构成	131
6.2 信号预处理装置	131
6.2.1 采用霍尔元件的信号预处理电路	132
6.2.2 采用集成霍尔元件的信号预处理电路	133
6.2.3 多元件组合检测处理电路	135
6.3 A/D 转换器	136
6.4 微型计算机	138
6.5 信号的等空间间隔采样	138
6.5.1 空间域信号采样及误差分析	139
6.5.2 信号的等空间间隔采样方法	142
6.5.3 位移测量编码器	144
6.5.4 等空间采样间隔的选择	145
6.6 检测系统评价指标	147

第七章 检测信号在线定量识别方法

7.1 检测信号特点及信号处理策略	149
7.1.1 多元件独立通道检测信号特点及信号处理策略	150
7.1.2 聚磁检测信号特点及信号处理策略	151
7.1.3 断丝在线定量检测过程	152
7.2 检测信号预处理技术	153
7.2.1 信号的平滑	153
7.2.2 野点信号剔除	154
7.2.3 股波信号消除	155
7.2.4 基于检测信号特征的数据压缩方法	158
7.3 断丝检测信号的提取方法	160
7.3.1 差分超限法	160
7.3.2 峰峰值超限法	164
7.4 随机干扰信号的剔除	166
7.5 基于统计模式的断丝检测信号定量识别	170
7.5.1 特征量的获取与描述	171
7.5.2 模式分类	180
7.5.3 断丝定量检测的试验结果	182

7.6 基于模型的断丝检测信号定量识别	186
7.6.1 模型化断丝定量检测原理	187
7.6.2 断丝漏磁场计算模型	190
7.6.3 传感器模型	194
7.6.4 信号处理模型	196
7.6.5 断丝定量识别与误差分析	197
7.7 基于模型的内、外部断丝定量识别	199

第八章 钢丝绳断丝检测仪及其应用

8.1 MTC-94 型钢丝绳探伤仪	205
8.1.1 工作原理及结构	205
8.1.2 功能及技术指标	206
8.1.3 面板说明	207
8.1.4 使用说明	208
8.1.5 应用	210
8.2 GDJY- I 型钢丝绳断丝定量检测仪	211
8.2.1 工作原理及结构	211
8.2.2 功能及技术指标	212
8.2.3 使用说明	213
8.2.4 断丝定量检测仪性能测试与评价方法	217
8.2.5 应用	220
8.3 GDJY- II 型钢丝绳断丝定量检测仪	230
8.3.1 工作原理及结构	230
8.3.2 功能及技术指标	231
8.3.3 使用说明	232
8.3.4 应用	232
参考文献	234

CONTENTS

1 Introduction	1
1. 1 Significance of Wire Rope Inspection	1
1. 2 Creation and Development of Wire Rope Inspection Technique	5
1. 3 Methods and Apparatuses for Defect Testing of Wire Ropes	11
2 Structure and Defect Characteristics of Wire Ropes	20
2. 1 Structure of Wire Ropes	20
2. 2 Defects of Wire Ropes	23
2. 3 Test Criteria of Wire Ropes	28
3 Magnetization of Wire Ropes	30
3. 1 Magnetization Options	31
3. 2 Magnetizing Methods	32
3. 2. 1 Magnetizer with Direct Circuit Magnetics	33
3. 2. 2 Magnetizer with Permanent Magnetics	34
3. 3 Magnetic Materials Option	35
3. 3. 1 Permanent Magnetic Option	35
3. 3. 2 Soft Magnetic Material Option	36
3. 4 Structural Analysis of a Magnetizing Circuit	37
3. 4. 1 Structure of Magnetizing Circuit	38
3. 4. 2 Relationship between δ and Magnetoconductivity G_δ	39
3. 4. 3 Relationship among δ and I_m and Magnetic Leakage Field Distribution in Yokes	40
3. 4. 4 Experimental Results of Magnetizing Circuit	41

3. 4. 5 Calculation of δ and L_m in Magnetizing Circuit	43
3. 5 Design and Magnetic Circuit Calculation of One Loop	
Magnetizers	44
3. 6 Design and Magnetic Circuit Calculation of Multiple	
Loop Magnetizers	53
3. 7 Performance Test and Examination	57
4 Principles and Methods for Measurement of Magnetic	
Leakage Flux Caused by Broken Wires	61
4. 1 Surface Magnetic Leakage Field Distribution of	
Magnetized Wire Rope Segment	62
4. 2 Analysis and Calculation of Magnetic Leakage Field of	
Breaks	65
4. 2. 1 Magnetic Leakage Field Distribution of a Single Broken Wire	66
4. 2. 2 Magnetic Leakage Field Distribution of External Broken	
Wires of Wire Ropes	71
4. 2. 3 Magnetic Leakage Field Distribution of Internal Broken	
Wires of Wire Ropes	74
4. 3 Magnetic Sensors	79
4. 4 Parameters of One Hall Element Use to Measure	
Magnetic Leakage Flux of Breaks	81
4. 4. 1 Longitudinal Resolution Power of Hall Elements	81
4. 4. 2 Signal-to-Noise Ratio of Hall Element Testing Signal	83
4. 4. 3 Circumference Inspection Range of Hall Elements	83
4. 5 Method with Multiple Elements and Independent Output	
Cannels	84
4. 6 Rope-Structure-Based Hall Elements Matrix Testing	
Method	86
4. 6. 1 Strand-Waveform Influence	87
4. 6. 2 Relationship between Rope Structure and Point Test Signals	89
4. 6. 3 Method of Hall Elements Array Use	93
4. 6. 4 Method of Hall Elements Matrix Use	97

4. 7 Principle and Approach of Magnetic Concentrating Test	99
4. 7. 1 Characteristics of Hall Elements Use in Measuring Localized Magnetic Leakage Flux	100
4. 7. 2 Principle of Magnetic Concentrating Inspection	102
4. 7. 3 Shapes of Concentrators for Broken Wires Inspection	108
4. 7. 4 Concentrator Size Option	114
5 Design of Detector for Broken Wires Inspection	118
5. 1 Performance Criteria of Non-Destructive Testing Detectors	118
5. 2 Principle of Mechanical Self-Adapting Centering Structure	121
5. 3 All-in-One Probe Based Detector with One Loop Magnetizer	123
5. 4 Cliplike-Probe-Based Detector with Multiple Loop Magnetizer	124
5. 5 Detector Installation and Fixing Cradles	124
5. 6 Design of Series of Wire Rope Detectors	127
6 Computer Aided Testing System	130
6. 1 Composition of Computer Aided Testing System	131
6. 2 Signal Preprocessing Unit	131
6. 2. 1 Preprocessing Circuit for Hall Elements	132
6. 2. 2 Preprocessing Circuit for Integrated Hall Elements	133
6. 2. 3 Preprocessing Circuit for Multiple Elements Combined Test	135
6. 3 Analog-to-Digital Convertors	136
6. 4 Microcomputers	138
6. 5 Spatial Domain Sampling	138
6. 5. 1 Spatial Domain Sampling and Its Error Analysis	139
6. 5. 2 Method of Equalization Spatial Interval Sampling	142
6. 5. 3 Displacement Meter and Encoder	144
6. 5. 4 Spatial Interval Length Option	145
6. 6 Criteria for Testing System Evaluation	147

7 In-Service Quantitative Interpretation of Test Signals	149
7. 1 Test Signal Features and Processing Strategies	149
7. 1. 1 Features and Strategy of Multiple Elements Testing Signals with Independent Output Cannels	150
7. 1. 2 Features and Strategy of Concentrator-Based Testing Signals	151
7. 1. 3 Procedure of In-Service Quantitative Inspection	152
7. 2 Digital Signal Preprocessing Technique	153
7. 2. 1 Signal Smoothing	153
7. 2. 2 Impulse Noise Rejecting	154
7. 2. 3 Strand-Waveform Signal Eliminating	155
7. 2. 4 Feature-Based Data Compressing Method	158
7. 3 Recognition of Break Test Signals	160
7. 3. 1 Method of Differential Value Exceeding Threshold	160
7. 3. 2 Method of Peak-Peak Value Exceeding Threshold	164
7. 4 Random Noise Rejecting	166
7. 5 Statistical-Pattern-Based Quantitative Interpretation of Break Signals	170
7. 5. 1 Selection of Feature Vector and Its Description	171
7. 5. 2 Classification	180
7. 5. 3 Experimental Results of Broken Wires Quantitative Inspection	182
7. 6 Model-Based Quantitative Interpretation of Break Signals	186
7. 6. 1 Principle of Model-Based Quantitative Inspection	187
7. 6. 2 Model of Magnetic Leakage Field Caused by Broken Wires	190
7. 6. 3 Model of Detector	194
7. 6. 4 Model of Signal Precessing Unit	196
7. 6. 5 Quantitative Inspection and Error Analysis of Broken Wires	197
7. 7 Model-Based Quantitative Inspection of Internal and External Broken Wires of Wire Ropes	199
8 Instruments for Broken Wires Inspection and Applications	204
8. 1 MTC-94 Model Wire Rope Detector	205

8. 1. 1 Operation Principle and Composition	205
8. 1. 2 Function and Specifications	206
8. 1. 3 Introduction	207
8. 1. 4 Manual	208
8. 1. 5 Application	210
8. 2 GDJY-I Model Instrument for Quantitative	
Inspection of Broken Wires of Wire Ropes	211
8. 2. 1 Operation Principle and Composition	211
8. 2. 2 Functions and Specifications	212
8. 2. 3 Manual	213
8. 2. 4 Performance Test and Evaluation Method of Instruments	
for Quantitative Inspection of Broken Wires	217
8. 2. 5 Applications	220
8. 3 GDJY-II Model Instrument for Quantitative	
Inspection of Broken Wires of Wire Ropes	230
8. 3. 1 Operation Principle and Composition	230
8. 3. 2 Functions and Specifications	231
8. 3. 3 Manual	232
8. 3. 4 Applications	232
Bibliography	234