

电阻应变仪

及其在轧机测定中的应用

孙一康 等編著

冶金工业出版社

电 阻 应 变 仪

及其在軋机測定中的应用

孙一康 等 編著

冶金工业出版社

电阻应变仪

及其在轧机测定中的应用

孙一康 等 編著

冶金工业出版社出版(地址:北京市灯市口甲45号)

北京市书刊出版业营业许可证出字第093号

冶金工业出版社印刷厂印 新华书店发行

— * —

1960年2月第一版

1960年2月北京第一次印刷

印数3,520册

开本 $850 \times 1168 \cdot \frac{1}{32}$ • 170,000 字 • 印张 $7 \frac{20}{32}$ • 插页 9

— * —

统一书号 15062 • 2051 定价 1.10 元

本书叙述了电阻应变仪的工作原理、结构及其在轧钢机测定研究中的实际应用。

全书共分二篇。第一篇较详细地介绍了电阻应变仪工作的物理基础、结构型式及其各个部份线路的设计与计算方法，指出了在各种情况下对每个部份的技术要求以及仪器试制和性能试验的方法。在第五章中并列出了现有的各种型号应变仪的具体线路以作参考。

第二篇介绍了利用应变仪研究轧钢设备的方法，叙述了轧机工作参数——轧制力、轧制力矩及零件应力的测定方法和所用装置的结构。

最后几章介绍了组织试验和具体测定实例的一些资料。在附录中介绍了轧钢机主电机参数的测量方法。

本书可供工厂、科学研究机关和高等学校的工程技术人员及科学研究人员参考。

目 录

前言.....	5
---------	---

第一篇 电阻应变仪

第一章 緒論.....	9
第二章 电阻絲应变器.....	14
第三章 测量基本电路.....	33
第四章 电阻应变仪的設計与計算.....	64
第五章 各种型号电阻应变仪的具体綫路.....	106
第六章 动态电阻应变仪的試制及性能測定方法.....	124
第七章 仪器及試驗研究的精确度問題.....	141

第二篇 軋鋼机測定研究方法

第八章 緒論.....	146
第九章 軋制力的測量方法.....	154
第十章 軋制力矩測量方法.....	177
第十一章 軋鋼机零件应力的測量方法.....	192
第十二章 現厂試驗研究的組織准备工作.....	202
第十三章 1900初軋机的研究.....	212
附录：軋鋼机电动机工作参数的測量方法	228
参考文献.....	243

前 言

最近几年来在工程技术和科学研究中广泛地使用了电阻应变仪作为研究工具，这是因为电阻应变仪比起其他方法来有其显著优越之处。

应用了电阻应变仪不但能在实验室中对各种机械和金属结构进行研究，而且能对生产中的设备进行测定，它不但能对缓慢的过程进行研究，而且能研究迅速变化的过程，并将力和应力、变形和应变、弯矩和扭矩、以及振动和撞击等参数随时间变化的曲线记录下来以便细致分析。

由于轧钢设备的工作和金属塑性变形有关，同时轧机零件形状又较复杂，目前应用理论方法尚不易精确确定各零件所受外力的大小(各种情况下的轧制力，力矩等)及零件的应力水平。因而在设计时安全系数取得极大，这就加大了轧机重量，并在使用时不能充分利用设备能力，而有时则又发生零件折断等事故。因此进一步研究各种轧机在具体生产条件下轧制力及力矩的大小以及各主要零件中应力的的大小是一项迫切需要解决的问题。解决此问题的基础则是实验，通过实际测定一方面直接了解了该轧机的情况，为进一步改善轧机工作创造了科学的基础，而在大量实验数据的条件下则又有可能检验已有理论的正确性，为创造新的理论创造条件。

因此电阻应变仪能帮助现厂工程技术人员和科学研究工作者深入了解机械与结构的实际工作情况和各种工作因素对此“工

作情况”的影响。它是設計制造、使用管理和科研教学单位都不可缺少的一种研究工具。

对于設計和制造单位来说，正确了解軋鋼机所受載荷的大小及性質（动載系数的問題）和零件中实际应力大小及分布規律后就有可能合理設計設備，減輕設備重量，并保证設計的質量。而制造过程中的工艺变更（如机架采用拼焊代替整体鑄造等）就更需要应用应力測定来加以驗證。

为了弄清現厂已有設備的潛在能力及受載情况以便强化軋制过程及合理安排生产提高軋机产量，現厂工程技术人员同样需要掌握应变仪的基本知識，以及它在軋机測定研究中的应用。

对于科研和教学单位則就更为需要了。現代的理論研究和实际設備的分析脱离了建立在現代科学技术基础上的先进測量研究方法是寸步难移的，事实証明实验技术水平的高低在很大程度上决定了一项科学研究的水平和价值。

苏联近几年来有大量研究机关試制和使用了各种型号（各种性能）的电阻应变仪，但由于具体要求的不同及仪器制造和使用經驗的不够成熟，目前动态电阻应变仪尚无大量成批生产，主要由各单位根据需要自己制造。

目前我国在科学研究迅速开展的情势下不少单位正在研究試制和掌握电阻应变仪。静态及靜动态电阻应变仪已有小量成批生产（上海华东电子仪器厂出品的57型静态电阻应变仪〔1〕及北京航空学院出品的祖国牌57—51型靜动态电阻应变仪〔2〕）。动态电阻应变仪則制成单位尚不多（北京工业学院8000載波的三綫应变仪，中国科学院长春机械研究所的УД—3М型和北京鋼鐵学院的“鋼机—4—58”A型四綫动态电阻应变仪）。

我們由1956年开始摸索試制动态电阻应变仪，在去年大跃进中制成了10000載波的四綫动态电阻应变仪“鋼机—4—58”A型

〔3〕，經過59年半年多的調整，性能達到了設計的技术要求，并在6月份和某厂合作成功地對巨型軋機——1000初軋機作了較全面地測定研究〔4〕并積累了一定的資料和經驗。

考慮到目前这方面中文的系統資料較少，而目前試制和試用變儀的單位愈來愈多，介紹各種電阻變儀的工作原理和基本知識是很必要的（電阻變儀如使用不正確，其所得結果的誤差甚至會超過一般的簡單測量方法）。因此綜合了目前所有的文獻（主要是蘇聯的）及我們工作中的一些體會和看法編寫成此書。

本書由兩部份組成。即第一篇（1—7章）主要敘述了電阻變儀的原理和實踐，介紹了其各個環節——變電阻片，測量電橋，放大器等結構和線路，並對各種線路方案作了分析比較，給出了設計計算的方法。第五章中列出了現有各種型號電阻變儀的具體線路以供設計時參考。最後介紹了儀器試制和性能測定的方法。第二篇主要介紹應用電阻變儀研究軋鋼機主要工作參數——軋制力，軋制力矩，零件應力等的測量方法和所用裝置的結構。

最後敘述了在現廠中對生產設備測定研究的組織準備工作，並以我們對1000初軋機研究的情況作為實例。

由於對軋機測定時一般需同時對其一些電參量進行測量，這雖然和電阻變儀無關，但為了讀者方便在文中有關之處亦進行了敘述，並在書末加了一章“軋鋼機電動機工作參數測量方法”作為附錄。

北京鋼鐵學院冶金機械教研組的劉宏才同志編寫了第四章中“具體線路計算方法”部份。高慶福，王志正同志供給了有關的實驗資料，並參加了第六章的編寫。沈久珩同志參加了第九、第十章的一部份及第十二章的編寫。

此外參加“鋼機—4—53”A型動態電阻變儀試制工作的尚

有武金泉、刘馥贞、付懋刚、宋志庆、沈士虹及吴复元等同志。

由于在这方面我們也只是刚开始摸索，目前尙正在进行研究，經驗很少，書中可能存在不恰当的地方，希望讀者来信指正，来信可寄“北京钢铁学院冶金机械教研組”。

編著者

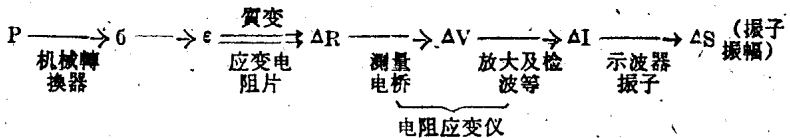
1959年10月

第一篇 电阻应变仪

第一章 緒 論

电阻应变仪主要用来研究金属结构及机械零件的应变和其它与应变有关的机械参量（应力，力，弯矩，扭矩等）。其工作原理如下：贴在（应用专门的胶剂）零件需测应变之处的应变电阻片随零件一起变形，而由于“应变效应”引起的电阻变化（将应变转换成电阻变化），经过一定的线路则可转换成电压或电流变化而加以记录。

其转换过程可表示如下：



由此可知应用电阻应变仪测量时需有以下几个部份：

- 1) 机械转换器：主要用来将机械参量和应变发生固定关系，如测轧制力时用特殊设计的测压头等，但如果直接测量零件应力则此项可不需要（零件的应力和其应变直接有关，不必转换）；
- 2) 应变电阻片：它起一质变作用，将机械参量（应变）转换成电参量（电阻变化）；
- 3) 电阻应变仪：由于电阻不好测量和记录（由应变引起的电阻变化是极小的）需将其转换成其它电参量（电压或电流），并且往往尚须放大以便推动示波器振子。由于所测对象具体情况不同，应变仪的结构和工作原理亦有很大出入。应变仪本身亦是

由許多部份組成的；

4) 測量(記錄)器：用來將電流變化(或電壓)顯示出來轉變成指針的或光點的位移(後者可用膠卷記錄下來)，如 МПО-2 型八綫電磁示波器。

其中 2) 及 4) 有現成產品，而 1) 需根據具體情況設計製造。至於電阻應變儀有些已成批生產，但有些目前尚無標準成品，一般由研究機關根據需測過程的特性自己設計和製造(包括應變儀的輔助裝置如電源穩定器等)。

電阻應變儀的分類法很多，例如：Н. П. Раевский 建議[5] 按所測對象的工作過程時間長短來分：

- 1) 用於靜載：工作過程極緩慢；
- 2) 用於慢變化的過程；

3) 用於短時過程：由 $\frac{1}{100} \sim \frac{1}{10000}$ 秒(包括撞擊)。

Н. И. Пригоровский 則建議[6] 分成四類：

- 1) 用於測量靜載，0 周/秒；
- 2) 測量 0~200÷300 周/秒的過程；
- 3) 測量 0~1000÷1200 周/秒的過程；
- 4) 測量 5÷10~40000÷50000 周/秒的過程。

而 М. Б. Георгиевский [7] 認為，最好按儀器結構來分(圖 I-1)：

- 1) 用直流供橋；
- 2) 用脈沖電流；
- 3) 用交流(載波)。

不過我們認為上述幾種分法都不夠全面，實際上工作過程的長短直接影響着儀器結構方案的(當然有時有二種或二種以上的結構方案可用於同一目的，但一般說工作時間長短和儀器結構方案還是有其一定的內在聯繫)。因此建議用下列方法來分：

- 1) 靜態電阻應變儀：用來測量 0 周/秒的過程，例如在實驗

室内进行零件及结构模型的应力分析等，此时由于变形过程极慢，可用一般灵敏电表来观察应力大小（不必放大），这就使仪器结构大为简化，而且为了提高测量精度大多采用零读法（即人为改变电路中平衡电阻来抵消由应变引起的电阻变化，而使仪器输出回到零位，此时可由平衡电阻改变多少而得知应变的大小）。

最基本的线路结构如图 I-1 中的 I-a 或 II-a 所示。但一般对静态电阻应变仪另有一特殊要求，即要求能进行多点测量，这对进行零件应力分布研究是很重要的，当测量点较少时（几十个点）则尚可采用手动型式，为了能在一定外载下逐个测量各点应变大小，仪器专设有平衡箱，其平衡电阻数目和测量点数相同，但当测量点多（几百个点）则一般就采用自动型式，利用小电机自动逐个接通各点线路，并记下每点的应变大小，此时，其线路结构将大为复杂（详细内容见第四章）。

有时为了提高测量灵敏度，亦有采用放大装置，此时结构方案和静态应变仪相似。

2) 静态电阻应变仪：用来测量 $0 \sim 200 \div 300$ 周/秒的过程，它一般既可以用来测量静载（配有平衡箱可进行多点测量——此时用手动式），但亦可测量变化较慢的动载，例如起重机桁架结构等。由于一般电表有机械惯性，很难显出几百周/秒的变化过程，因此测动载时需用电磁示波器进行记录。可是示波器振子需有较大的功率才能推动，测量电桥的输出功率远远不能满足所以一般需采用放大装置。将信号放大后再用示波器记录之。由于目前直流放大器（放大率较大时）性能不够稳定，一般都采用交流放大器（电压及功率放大），这就决定了供桥电源必须采用较高频率（载波）以便和工作信号进行调制后再输入放大器（ $\omega_n \approx 10\Omega_{max}$ ， ω_n 为载波， Ω_{max} 为工作信号中最大频率成份^①，调制后所得的信号频率为 $\omega_n \pm \Omega_{max}$ ——详细证明见后面），为了记录下

① 这里所指的是正弦波的频率，今后亦如此。

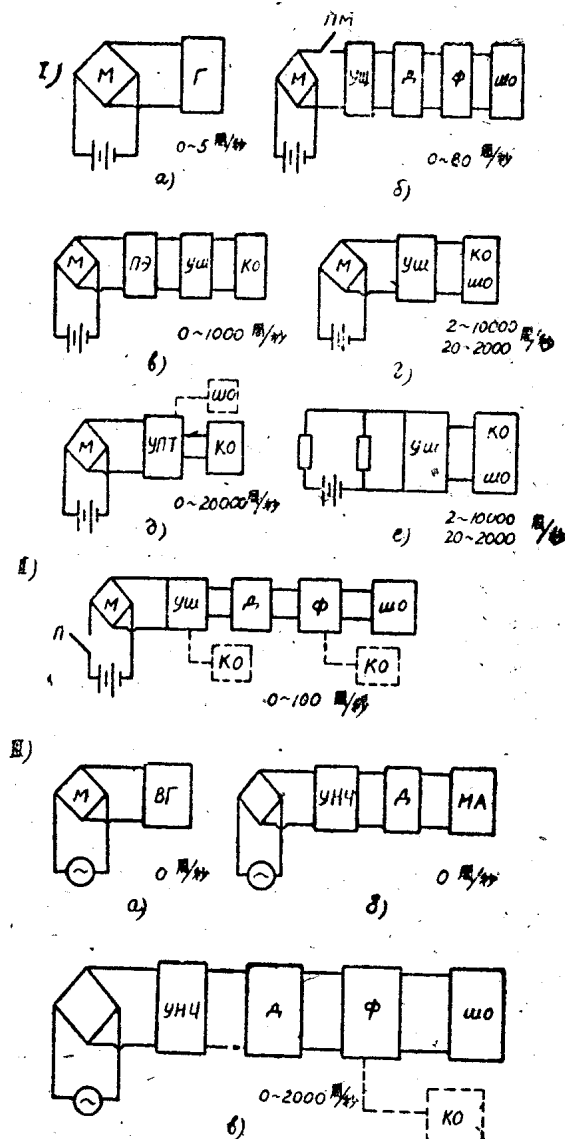


图 1-1

М—电桥; ПЭ—电磁机械示波器; КО—阴极示波器; УШ—宽频带放大器; УНЧ—载波放大器; УНТ—直流放大器; А—检波; Ф—滤波; ПМ—机械开关; ПЭ—电子开关

工作信号，混合信号放大后需经过相敏检波和滤波等步骤将载波去掉，整个仪器的结构方案如图 I-1 的 ■-6 所示。

3) 动态电阻应变仪：用来测量 $0 \sim 1000 \div 1200$ 周/秒的过程，此时并不用来测量静载，主要用于高速机械零件的应力及力的测量，例如轧钢机的轧制压力等，由于测量过程中往往包含有低频成份，因此尚须采用上述载波放大的原理（低频成份交流放大器很难放大，而需经过调波后由载波“带”过去，同时，由于 Ω_{max} 尚不算太大，载波尚在允许范围内）。动态电阻应变仪线路结构和静动态的相同，只是由于载波较高而使对仪器各部份要求较严，因而使各部份具体线路较为复杂，需在各部份具体线路中采取一些措施，同时使用时困难亦较大。

4) 超动态电阻应变仪：用来测量 $5 \div 10 \sim 5000 \div 20000$ 周/秒的过程，主要是用来测量弹性及塑性撞击，此时由于 Ω_{max} 较大，无法采用载波放大（载波频率 $\omega_n > 10000$ 后将使仪器工作大为困难），而另一方面由于工作信号的低频成份一般可大于 5 周/秒（有的可大于 20~50 周/秒），因此，有可能利用宽频带放大器直接放大（不用载波），这样，反而使结构方案大为简化（图 I-1 的 I-r，及 I-e）。

由此可知使用电阻应变仪时应根据具体条件确定用那一种类型，并根据对各个部份的技术要求（详细见后面）来设计和选择相应仪器才能保证实验精度。

为了深入了解各个环节的工作原理和设计计算方法，下面将分章详细叙述。

第二章 电阻絲应变器 (Проволочные тензодатчик)

§ 1-1 应变效应 (Тензоэффект)

电阻絲应变器 (又称电阻絲轉換器——Проволочные преобразователи) 可簡称为应变电阻片, 其工作过程基于导体的「应变效应」, 亦即导体电阻随着机械变形量而变化的物理现象。

实验研究証明, 机械变形时导体的电阻不光是由于其几何尺寸的变化而改变, 而且还由于其比电阻变化而改变。实际上如果比电阻值不变則:

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

$$\Delta R = \rho \frac{\Delta l}{S} - \rho \frac{l \Delta S}{S^2}$$

$$\therefore \frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta S}{S} = (1 + 2\mu) \frac{\Delta l}{l}$$

因而其敏感系数 k_ϵ 为:

$$k_\epsilon = \frac{\Delta R}{R} / \frac{\Delta l}{l} = 1 + 2\mu$$

以上式子中 l 为电阻絲的长度;

S 为电阻絲的断面积;

R 为电阻絲的电阻;

ρ 为其比电阻 (电阻系数);

μ 为电阻絲材料的波桑系数, 一般为 0.24 ~ 0.4。

因此 $k_\epsilon = 1.48 \sim 1.8$, 但实验求得的不同材料之 k 值往往在

此范围外，由此可知k值应由下式确定：

$$k_{\varepsilon} = \frac{\Delta R}{R} \bigg/ \frac{\Delta l}{l} = (1 + 2\mu) + \frac{\Delta \rho}{\rho} \bigg/ \frac{\Delta l}{l}$$

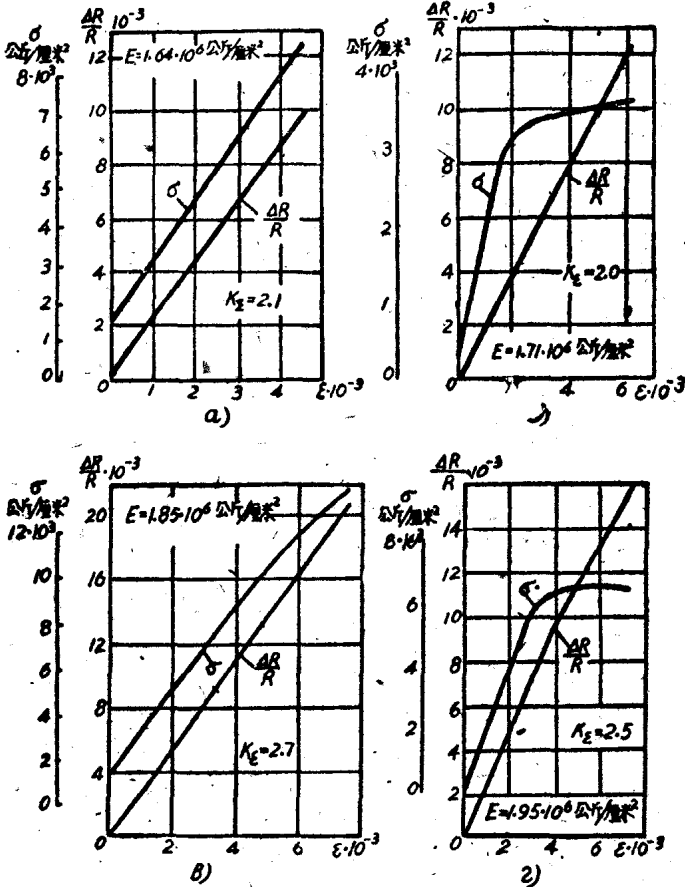


图 II-1 $\frac{\Delta R}{R}$ 与 ε 的关系曲线

a—未退火的康铜丝；б—退火后的康铜丝；

в—未退火的镍铬丝；г—退火后的镍铬丝

由于 $\frac{\Delta \rho}{\rho} / \frac{\Delta l}{l}$ 对一般材料来说在弹性变形时为一常数, 所以 $\frac{\Delta R}{R}$ 与 ϵ 即 $\left(\frac{\Delta l}{l}\right)$ 将成直线关系 (有些材料甚至塑性变形初段尚如此)。图 I-1 列出了一般作电阻丝用的材料的 $\frac{\Delta R}{R}$ 与 ϵ 的关系。

I-2 电阻丝应变器的结构

电阻丝应变器由电阻丝栅 (一般绕成环套形), 用专门胶粘于纸质垫片上而组成 (图 I-2)。图 I-2 中 1 为将电阻片粘于零件上的胶层; 2 为纸垫; 3 为将电阻丝栅粘于纸垫上的胶层; 4 为保护纸片; 5 为电阻丝栅; 6 为铜导线。

应变电阻片用专门胶粘于工作零件需测其应变 (应力) 之点上, 零件应变通过胶层和纸垫传给电阻丝栅, 因而使机械应变转换成电阻变化。

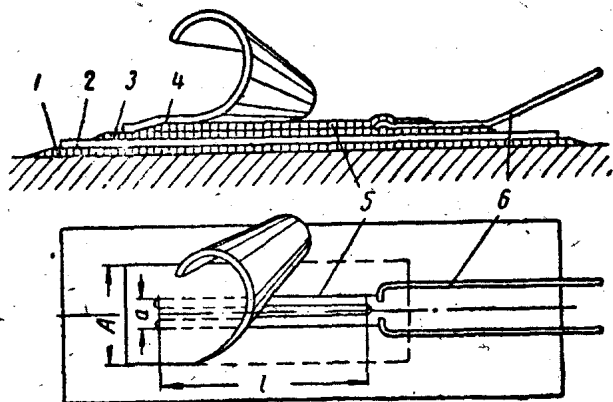


图 I-2 应变电阻片结构及其和工作零件的粘接情况

因此为了保证测量精度需满足以下条件:

- 1) 胶或凝结剂 (Цемента) —— 用来将电阻丝栅固定于纸