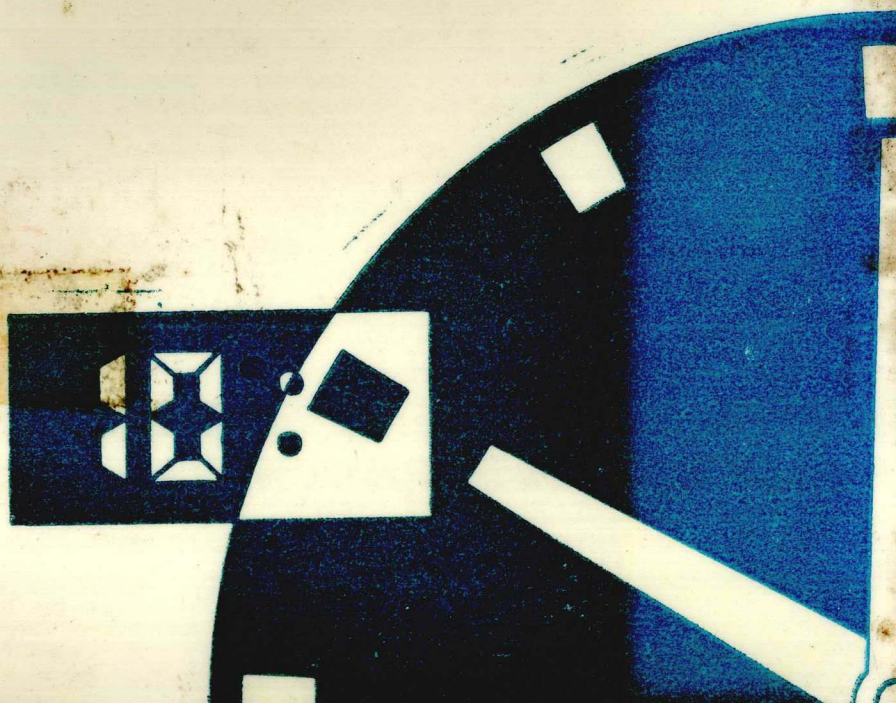


石英钟表走时精度分析

〔西德〕 F·施密特 著



石英钟表的走时精度 分 析

由斯图加特大学批准获
得教授、工程师学位的
论 文

由出生在乌尔穆 (Ulm) 的
弗里茨·施密特 (Fritz
Schmidt) 提交

主要报告者: 教授、博士、哲学家
G·格拉泽尔 (G·Glaser)

助理报告者: 教授、博士、工程师
恩斯特·吕德尔
(Ernst·Lüder)

提交日期: 1979.10.17

口试日期: 1980.6.26

前

言

本书是西德 ISO/TC114 代表 D·博雷 (D·Bore) 教授代表西德代表团意见向 SC11 分委员会提交的分析报告。主要报告者 G·格拉泽尔教授 (原任西德斯图加特钟表研究所所长) 是国际计时学方面的权威, 很有影响力。本书对外界环境对石英电子钟表的关键元器件所产生的种种影响作了有说服力的理论推导及实验论证。从局部到整体, 从整体到局部进行了反复推证, 考虑分析面之广, 工作量之大引起世界各国计时学界的充分重视。在一九八四年天津召开的我国石英电子钟表标准审定会上, 本书的若干论据曾作为引证。

本书虽然页数不多, 但理论价值却不小。本书内容丰富, 观点独特, 论证充分, 数据准确可靠, 适于计时专业的工作人员、教师和学生及计时专业相关学科的工程技术人员阅读。本书对于石英电子钟表的研究及其标准的制订都是大有参考价值的。

本书译出后, 轻工部钟表研究所陆建成同志及柳立新同志对其中的每一个公式、每一个数据都进行了认真推算, 详细校核, 并有轻工部钟表研究所肖兆权同志协助描图。在出版过程中还得到轻工部钟表研究所赵毅、赵燕玉、刘振山等同志的帮助, 在此一并表示感谢。

由于我们业务水平有限, 经验不足, 错误在所难免, 恳切盼望读者提出批评意见。

译 者

1985.6.

序

近年来在国际钟表市场上，石英电子钟表迅猛发展，传统的机械钟表有被淘汰的可能。在我国，石英电子钟表的产量和销售量也逐年增加，发展很快。正因为如此，我国和世界各主要钟表生产国对于石英电子钟表的研究、开发及其标准化工作都非常重视。

在传统的机械钟表标准化工作中，各国都以走时的精确程度来划分等级以确定质量的优劣。石英电子钟表具有机械钟表所达不到的高走时精度。在石英钟表标准化工作中，世界各国都把走时精度的分析、测试和计算方法作为主要的研究课题。目前尚未形成统一的、成熟的国际标准。

本文对石英电子钟表的使用环境条件，造成走时误差的原因进行了详细的分析，引用了大量实验数据，并对于走时精度的测试方法及其误差的计算公式提出了一套完整的理论。这是一篇学术论文，也是西德石英钟表国家标准的理论基础。西德的理论具有与日本、瑞士不同的独到之处。

本书不仅对我国的石英电子钟表工业标准化工作极有参考价值，而且对于石英电子钟表的研究和开发也有一定的参考价值。

邹逸民

1984年3月

内 容

参考文献目录 最重要的符号

1. 序言

1.1 历史发展

1.2 指示差、日差和走时误差概念的定义

1.3 比较钟表可达到的走时误差

1.4 实现民用石英钟表

1.4.1 石英钟

1.4.2 石英表

2. 引起走时误差的原因

2.1 石英钟表的结构及外界因素对其走时的影响

2.2 振荡器

2.3 石英振子

2.3.1 等效数据

2.3.2 振幅-非等时性

2.3.3 频率-温度特性

2.3.4 气压和湿度的影响

2.3.5 重力影响（位置影响）

2.3.6 老化

2.4 串联电容器

2.5 CMOS-放大器

2.6 分频器

2.7 短时稳定性

2.8 长期稳定性

3. 测试石英钟表走时差的测试方法和仪器及其测试精度

3.1 一般情况

3.2 通过检测秒指针测定指示差

3.2.1 测试原理

3.2.2 采用光电法减小测试误差

3.3 电感测试和电容测试步进脉冲

3.3.1 步进脉冲的变化

3.3.2 电感测试

3.3.3 电容测试

3.4 对数字显示的钟表进行电容测试

3.5 电容测试振荡器频率

3.6 通过声音测试石英振荡器频率

4. 石英钟的走时差

4.1 石英钟的使用条件

4.1.1 民用石英钟的使用温度范围

4.1.2 由温度引起的石英钟的走时误差

4.1.3 由空气湿度引起的走时误差

4.1.4 工作电压的影响

4.1.5 长期稳定性

4.1.6 民用石英钟的机械应力

4.2 计算其余走时误差

4.3 民用石英钟的走时误差

5. 石英手表的走时差

5.1 石英手表的使用条件

5.1.1 石英手表的温度

5.1.2 由温度引起的石英手表的走时误差

5.1.3 由空气湿度引起的走时误差

5.1.4 工作电压的影响

5.1.5 长时稳定性

5.1.6 机械应力

5.2 石英手表的走时误差

6. 石英钟表测试结果比较

7. 石英钟表每年的指示差变化

8. 减小走时误差的办法

9. 石英钟表的可靠性和质量

9.1 使用环境条件的影响

9.2 石英钟表与机械钟表相比时的可靠性及故障率

9.3 质量、走时误差和价格之间的关系 履历

参考文献目录

- BASSC : 瑞士精密时计年鉴
 JDGC : 德国精密时计协会年鉴
 UT : 钟表技术杂志, W·Kempter
 出版社, 乌尔穆 (UIm)
- 〈1〉 Attinger, C. : 气流对扭摆钟振荡周期的影响; BASSC 第 II 卷 (1942/49) 1947, 406—444 页
- 〈2〉 Benzler, S. : 采用数字调整法调整和补偿外界影响; JDGC 28 (1977), 16—24 页
- 〈3〉 Benzler, S. : 石英钟表的调整
- 〈4〉 Benzler, S. : 采用数字调整法
- 〈5〉 Beuchat, J. C. : 手表的冲击实验; BASSC 1973, 第 4 卷, 499—506 页
- 〈6〉 Beuchat, J. C. : 手表佩戴条件的测量;
 Grandjean, R. : BASSC 第五卷, (1965/69)
- Botta, A. : 1969, 753—761 页
- 〈7〉 Briese, W. : NT 和 XY-弯曲谐振器, GT 和 AT-切石英振子的老化误差和频率-温度特性; JDGC 25/II (1974), C9
- 〈8〉 Briese, W. : 4 兆赫钟表石英振子, 技术水平, 新发展和技术极限; JDGC 29 (1978), 5—6 页
- 〈9〉 Briese, W. : 在 HF-钟表石英振子方面的新成果; JDGC 30 (1979)

- 〈 10 〉 德国气象站 : Offenbach中心局;
霍夫 (Hof), 汉堡 (Ha-
mburg) 和弗赖堡 (Freib-
urg) 三个城市的 温度和空
气湿度的频率分布
- 〈 11 〉 DIN8236 : 测时技术概念
- 〈 12 〉 DIN8319 : 第二部分: 具有压电振荡系
统的精密手表
- 〈 13 〉 DIN8325 : 石英钟
- 〈 14 〉 DIN8236 : 具有压电振荡系统的手表
- 〈 15 〉 DIN40880 : 一次性直流电池
手表用圆形钮扣电池
- 〈 16 〉 Dittmar, K : 根据短时走时测试, 确定手
表走时精度的方法;
斯图加特大学论文, 1965
- 〈 17 〉 Fischer, R. : 用于民用石英钟表的低频
NF和 $\times + 5^\circ$ -弯曲谐振器的
特性和特殊使用的问题;
斯图加特大学论文, 1974
- 〈 18 〉 Fischer, R. : 对于民用石英钟表低频弯曲
诸振器的老化特性进行实验
分析; JGDC 25/II;
(1974) C8
- 〈 19 〉 Flaig, H. : 石英闹钟的质量和可靠性,
UT4 (1977), 第四期,
14—18页
- 〈 20 〉 German, S. : 关于一些计时技术概念的定义;
钟表23(1968), 第5期,

22—26页

- 〈 21 〉 Glaser, G. : 指示差, 走时, 走时变化, 走时精度, 走时误差的概念及其规定; 钟表22(1967), 第8期, 37—40页, 第9期 19—25页
- 〈 22 〉 Glaser, G. : 精密時計和钟表技术手册, 第Ⅱ卷, 初次重版本: 防水钟表; 代销出版社 W·K-empter, 乌尔穆 (Ulm)
- 〈 23 〉 Glaser, G. : 石英钟表技术——前言; W·Kempter出版社, 乌尔穆 (Ulm), 1979
- 〈 24 〉 Hatschek, R. : 手表用音叉石英振子及其生产工艺; JDGC (1978) 特卷, 2c
- 〈 25 〉 Hocht, W. : 石英钟及石英闹钟钟壳的脉冲频谱; UT5 (1978), 第3册, 9—15页
- 〈 26 〉 Karolus, A. : 用石英晶体做成的音叉; JDGC5 (1954), 29—37页
- 〈 27 〉 Karolus, A. : 重力对音叉频率的影响; 应用物理杂志, 14卷, 8册, 462—465页
- Thiesb rger, K.,
- 〈 28 〉 Kern, E. : 分析手表的冲击应力; JDGC25/Ⅳ (1974), E8
- 〈 29 〉 Layer, A. : 钟表石英的防震性; JDGC 29 (1978), 31—37页

- 〈 30 〉 Rüdiger, A. : 手表用一次性电池; UT4
(1977), 4期, 9—13页
- 〈 31 〉 Schenk, H. : 用一个佩戴式温度记录器测试手表的温度变化; 斯图加特大学钟表技术和精密机械研究所毕业论文, 1952
- 〈 32 〉 Schmidt, F. : 石英钟表的质量检查; UT4
(1977), 4期, 4—8页
- 〈 33 〉 Schüle, W. , 住房内的空气湿度和空气温度; 健康-工程师
Lutz, H : 杂志 1962, 8期, 217—252页
- 〈 34 〉 Struckmann, R. : 在空气干燥的情况下, 装配钟表设备的结构和试验; 斯图加特大学钟表技术和精密机械研究所的研究论文, 1978
- 〈 35 〉 Tyrode, R. : 根据测试结果对石英表和机械表的可靠性进行比较; 法国精密時計年鉴1978, 第2卷 105—110页
- 〈 36 〉 Zumsteg, A. E. : 高度精确的手表用 4.19 兆赫 - 微型石英振子; JDGC 29 (1978) , 19—24页

重要的符号及缩写

t	时间、指（显）示数值
t_0	指示差
f	频率
ω	圆周频率（角频率）
F_r	相对频率差
T	周期
τ	时间常数，积分时间
G	走时差
U	走时误差，有关指数表示产生的影响参数
v	温度
φ	空气相对湿度
U	电压
P	气压
Ci	走时与以指数所表示的影响参数有关的系数
S	标准误差
H	相对频率
λ	故障率
g	重力加速度
QAU	石英手表
QGU	石英钟
LCD	液晶显示
LED	发光二极管

其它缩写及双名称在有关章节处解释说明

1. 序言

1.1 历史发展

自从惠根斯 (Huygens) 和虎克 (Hooke) 把摆 (摆锤式摆) 和具有固有频率的游丝摆轮振荡系统作为时间基准用于表钟技术以来, 人们就不停地对其进行改进, 尽力减小外界对它的影响以及努力寻求新的、更好的振荡系统。

1880 年、在居里 (Curie) 兄弟发现了压电效应之后, 人们很快就将以压电方式所激励的谐振器用作时间标准和频率标准了。

直到发明了晶体管和集成电路, 石英钟表的生产成本也还很高, 所以, 石英钟表的计时精确性是人们生产它的最主要的原因之一。

自从 1969 年 M·福雷尔 (M·Forrer) 介绍了第一只石英手表样机以来, 特别是由于在集成电路领域内所取得的进步, 民用石英钟表技术有了迅速发展。

由于研制成了更小的和耐震的手表石英音叉和降低了振荡电路及分频电路的耗电量, 所以, 这就为 1977—1978 年石英表商品化创造了先决条件。

1.2 指示差、日差和走时误差概念的定义

用于测时技术概念的意义业已标准化了〔11〕, 并且根据某些刊物〔20〕, 〔21〕来看, 已经采用了这些概念的意义。

一只钟表的指示值是以原点开始计算的, 每个指示值与钟表盘上的时间刻度相符合, 例如, 对于有表盘的钟表来说, 以指针的位置来表示时间, 或者对于采用数字显示的钟表来说, 是以数值来表示时间的。

指示差：

指示差，即实际指示时间 t_x 和标准指示时间 t_n 之差表示一只钟表的指示差 t_e 。

$$t_e = t_x - t_n \quad (1.2.1)$$

走时差：

一只钟表经过观察时刻 t_{n1} 和 t_{n2} 之间时间间隔的走时差等于标准时间间隔除对时刻 t_{n1} 和 t_{n2} 所测得的指示差值之差。

$$G(t_{n1}, t_{n2}) = \frac{t_{e2} - t_{e1}}{t_{n2} - t_{n1}} = \frac{(t_{x2} - t_{x1}) - (t_{n2} - t_{n1})}{t_{n2} - t_{n1}} \quad (1.2.2)$$

走时差数值总是与测试间隔相联系在一起的，通常用单位秒/天(s/d)来表示。瞬时差 G ，即经过很短时间间隔的走时差，虽然可以用单位秒/天来表示，但是，一只钟表经过一天的走时差 G_d 却不能立即从瞬时差 G 求得。

一天的走时差必须进行单独测试或者通过对一天全部瞬时差的积分来计算。

$$G_d = \frac{1}{\tau_0} \int_0^{\tau} G \cdot dt \quad \tau = 1 \text{天} \quad (1.2.3)$$

在钟表指示部分和确定频率的振荡器之间连接的积分装置(分频器或轮系)之传输特性为不变的前提下，钟表的走时差等于其振荡系统的相对频率差 F_c 。

$$F_c = \frac{f_x - f_n}{f_n} = \frac{\Delta f}{f} \quad (1.2.4)$$

当 $f = \frac{1}{T}$ 时，则得到相应周期的关系式

$$F_c = \frac{1/T_x - 1/T_n}{1/T_n} = \frac{T_n}{T_x} - 1 \quad (1.2.5)$$

当 $f = \frac{1}{T}$ 时，并且还得到周期相对误差的关系式

$$\frac{\Delta T}{T_n} = \frac{T_x - T_n}{T_n} = -F_c \frac{T_x}{T_n} \quad (1.2.6)$$

由关系式1.2.6推知，只有当 $\frac{\Delta T}{T_n} \rightarrow 0$ 时，就是说，当 $\frac{T_x}{T_n} \rightarrow 1$ 时，走时差才等于周期相对误差。测试周期时，由下面的数量方程式得到精确的走时差数值：

$$G (\text{秒/天}) = 86400 \left(\frac{T_n(\text{秒})}{T_x(\text{秒})} - 1 \right) \quad (1.2.7)$$

走时误差

一只钟表的每天实走日差不能直接从瞬时差计算得到这一事实的原因主要是由于影响实走日差的工作条件的变化。

因此，一只钟表的实走日差是不稳定的，而是围绕一个平均数值 $\bar{G}$ 变化的。一只钟表实走日差与平均数值 $\bar{G}$ 的标准差是其质量的尺度，走时误差为 U 。

$$G = \bar{G} \pm U \quad (1.2.8)$$

走时误差是由各种不同影响结果引起的，这些影响的总结果将按照分布率以均方根计算：

$$U_{ges} = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + \dots} \quad (1.2.9)$$

对于机械钟表来说，将钟表的延续走时1天作为基本时间， U 用秒/天 (s/d) 表示。

但是，对于石英钟表来说，延续走时至少为一年。在这样长的时间内，除走时差变化外，也还出现引起平均数值 $\bar{G}$ 的长期变化的系统成分。一只石英钟表在一年内的走时差可用下式表示：

$$G = G_0 + G(t) + U \quad (1.2.10)$$

式中， G_0 是在规定的工作条件下，延续走时开始时所

调准的日走时差。

走时差 $G(t)$ 是由下列两点构成：

1) 工作参数与调节条件及引起的长期变化的走时差变化的误差

2) 老化引起的走时差变化

在一般情况下，这种由老化引起的走时差 $G(t)$ 部分主要的，其值也往往大于走时误差的值。

只有采用大型仪器或者耗费许多时间（4.1.5节）才能测出老化率。对于民用石英钟表来说，实际上则不必测量其老化率。

但是，如果不知道老化率的话，也就不能确定走时差 $G(t)$ 。

鉴于石英钟表与机械钟表所不同的是走时误差值很小，所以，最好把延续走时一年作为基本时间，同时把老化率计算在走时误差内，于是便得到一只石英钟表在一年内的走时差：

$$G = G_0 \pm U \quad (1.2.11)$$

因此，根据各种不同影响的结果，该走时误差 U 不能再按照关系式（1.2.9）来计算，作为 G_0 在一年内的最大误差必须按下式计算：

$$U = |U_0| + |U_A| + |U_V| + |U_U| + |U_F| + |U_P| + \dots \quad (1.2.12)$$

式中：

U_0 是由材料性能的静态变化引起的（例如摆幅变化、噪声）变化。

U_A 老化过程引起的走时差变化。

U_V 温度影响引起的走时差浮动和走时差变化。

U_0 工作电压变化所引起的走时差 浮动和走时差变化。

U_F 空气湿度影响引起的走时差变化。

U_P 气压变化所引起的走时差变化。

1.3 比较钟表可达到的走时误差

与其它谐振器相比,石英振子的Q值非常高,所以,石英钟表所达到的走时误差对于传统的振荡系统来说是根本达不到的,或者只有不惜昂贵代价才能达到这种走时误差。

在表格 1.3.1 中已列出了不同类型钟表的走时误差及其影响走时的各种因素的例子。此外,在适合于有关类型钟表的德国工业标准中所给定的极限值及一般测试值将作为计算基础。机械钟表的走时误差按照Dittmar [16] 计算。

机械钟表的基本走时为一天,石英钟表的基本走时为一
年(公式1.2.11)。

1.4 民用石英钟表

正如机械钟表和电钟表那样,我们也把石英钟表分为石英钟和石英手表。其技术水平的详细对照已列入 [23] 中。

民用石英钟表的主要构造如下所述:

1.4.1 石英钟

石英振子:

4.194304 兆赫, AT 切割, 厚度剪切谐振器, 园片形状或透镜结构。

振荡器和分频器电路:

CMOS-技术, 工作电压1.5伏

振荡器: 其倒相放大器采用 π -电路和串联电容器

分频器: 其分频比为 2^{22} , 用驱动器来控制电机转换器或LCD-显示器

同步电机的控制电路和数字调节电路使用得很少。