

平衡技术理论与实践

〔西德〕哈托·施奈德 著

机械工业出版社

本书主要包括平衡技术理论、平衡技术实践及现场平衡等。平衡技术理论主要介绍物理基础、定律、振动,不平衡的产生及原因以及各类转子的平衡测试。平衡技术实践主要介绍各类平衡机的设计、结构、工艺及其校正等。现场平衡主要介绍现场平衡理论、方法及其条件等。

本书可供从事平衡技术工作的技术人员、工人参考。

Auswuchttechnik

Dipl.-Ing. Hatto Schneider

VDI-Verlag GmbH

Verlag des Vereins. Düsseldorf

1 9 7 7

* * *

平衡技术理论与实践

[西德]哈托·施奈德 著

廖日岳 译

叶能安 校

*

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

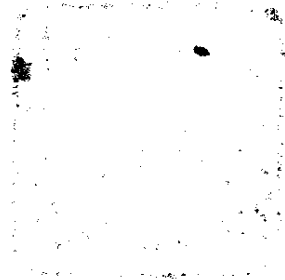
开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ · 印张 $8 \frac{5}{8}$ · 字数 183 千字

1981年6月北京第一版·1981年6月北京第一次印刷

印数 0,001—4,000 · 定价 0.90 元

*

统一书号: 15033 · 4971



译 者 的 话

这是一本平衡技术的基础读物，内容很丰富，涉及到本领域中的各种问题，从原理到实践，从平衡方法到平衡设备都作了介绍。本书特点是避免用高深的数学推导，以阐明物理概念为主。

本书也可以说是一本手册，除编入了近年来国际标准化组织制定的一些标准规范，定义术语外，还在书末附有大量的图表，供实际工作中查对。

本书对从事平衡工作的工程技术人员、平衡机操作、调整维护人员是一本较实用的参考书；对从事本专业的研究设计人员也有一定的参考价值。

作者哈托·施奈德为西德卡尔·申克公司一位有学位的工程师，对平衡技术颇有研究。本书初版于1972年，1977年第二版，并有英译本。

本书是按德文第二版翻译的，对照英译本作了修改。原文排印中的明显错误，已作了改正，个别地方加了译注。为适应我国具体情况，从英译本译出换算表和常用公式以及ISO 1940和2953两个标准均编在附录上。

本书在翻译过程中，得到姜璜、张再实、倪新钱、张炳衡、孟庆丰等同志的帮助，在此表示感谢。限于译者的水平，在译文中难免有不妥之处，请读者批评指正。

1979.8,

初 版 前 言

平衡是任何一种基础工业不能不考虑的一个生产工序。它不仅在生产上，而且在检修，甚至在机器的保养方面也变得日益频繁。小型检修车间也和大型企业一样，均备有平衡机，而且也有着如转子系统那样的多种多样平衡问题。

为了要在本专业范围内取得相同的概念，标准和判断依据，最近几年来国际标准化组织在国际范围内作了许多工作，故有必要概述一下平衡技术目前标准。

本书主要面向本专业的初学者，以使他容易掌握本专业知识，也可供企业(在设计、试验和生产方面)中的技术人员参考。本书(相当手册)将有助于专业人员在日常工作中很好地解决所出现的各种各样的平衡问题。

哈托·施奈德

1972年6月于达姆斯塔特

再 版 前 言

本书由于在工业界已获得好评，并且得到持久的关注，所以德国工程师协会出版社决定再版此书。自从第一版出版后的四年中，国际标准工作已有了进展，因此，有必要对本书重新修订。

借此机会增添有关挠性转子这一章节，以使这个日益重要的领域让人们更加清楚明瞭。同时还编入专业词汇表，便于更好地查找有关问题。

哈托·施奈德

1977年1月于海本哈姆

符 号 表

$\vec{F}$	力 (牛顿)
$\vec{F}_{A,B}$	由于离心力引起的折算到轴承平面 A 与 B 的轴承力 (牛顿)
G	重力 (牛顿)
$G_{A,B}$	由于转子重力引起的折算到轴承面 A 与 B 的轴承力 (牛顿)
J	惯性矩 (公斤·米 ²)
L	轴承间距 (毫米)
M	转矩、力矩 (牛·米)
M_u	不平衡力矩、离心力矩 (牛·米)
M_o	原始不平衡
$\vec{V}$	速度
$\vec{W}$	角速度
g	重力加速度
n	转速
p	功率 (牛·米/秒)
T	周期
$\vec{r}$	半径 (米)
r_a	校正半径 (毫米)
r_i	惯性半径 (米)
S	重心
$\vec{U}$	不平衡量 (克·毫米)
$\vec{U}_{1,2}$	在 1 与 2 方向上的不平衡分量 (克·毫米)
$\vec{U}_{A,B}$	轴承平面 A 与 B 上的不平衡量 (克·毫米)
$\vec{U}_{I,I}$	刚性转子平面 I 与 I 上不平衡量; 互补不平衡量 (克·毫米)
$\vec{U}_c$	校正不平衡量 (克·毫米)

- $\vec{U}_m$ ——力矩不平衡量(克·毫米)
 $\vec{U}_q$ ——准静不平衡量(克·毫米)
 $\vec{U}_s$ ——静不平衡量(克·毫米)
 $\vec{U}_t$ ——试验不平衡量(克·毫米)
 $\vec{U}_R$ ——许用不平衡量(克·毫米)
 $\vec{U}_{Rs}$ ——许用静不平衡量(克·毫米)
 $\vec{U}_{Rm}$ ——许用偶不平衡量(克·毫米)
 $\vec{U}_p$ ——偶不平衡(克·毫米)
 $\vec{U}_e$ ——重心不平衡(克·毫米)
 $\vec{U}_{Res}$ ——不平衡合量(克·毫米)
 $\vec{e}$ ——重心偏心距(微米)
 e_R ——许用重心偏心距
 $\vec{a}$ ——加速度(米/秒)
 f ——重心与支承面的距离(毫米)
 g ——校正平面 I 与支承平面 A 的距离(毫米)
 h ——校正平面 II 与支承平面 B 的距离(毫米)
 l ——偶不平衡的杠杆臂(毫米)
 a ——校正平面间距离(毫米)
 b ——弧长(米)
 c ——校正平面 I 与重心的距离(毫米)
 d ——校正平面 II 与重心的距离(毫米)
 m ——转子质量(公斤)
 W ——功、能量(牛·米)
 t ——时间(秒)
 $\vec{x}$ ——振动位移的振幅(米)
 α ——平面角
 $\vec{\epsilon}$ ——角加速度(弧度/秒²)
 Q ——阻尼度
 φ ——相角(弧度)
 φ_0 ——零位相角(弧度)
 $\overline{\omega}$ ——角频率(弧度/秒)
 ω_0 ——固有角频率(弧度/秒)

目次

译者的话

初版前言

再版前言

符号表

1. 导言	1
1.1. 平衡技术的发展	2
1.2. 标准化工作	3
2. 平衡技术理论	6
2.1. 物理基础	6
2.1.1. 物理量	6
2.1.2. 标量与矢量	6
2.1.3. 量度单位制	9
2.1.4. 物理定律	10
2.1.5. 圆周运动	11
2.1.5.1. 平面角	11
2.1.5.2. 角频率	12
2.1.5.3. 圆周速度	13
2.1.5.4. 角加速度	14
2.1.5.5. 切向加速度	14
2.1.5.6. 传动转矩	14
2.1.5.7. 转动惯量	15
2.1.5.8. 径向加速度	15
2.1.5.9. 离心力	16

2.1.6. 振动	17
2.1.6.1. 离心式激励的单质量振动系	17
2.1.6.1.1. 下临界区	19
2.1.6.1.2. 谐振区	21
2.1.6.1.3. 上临界区	21
2.1.6.2. 自由度	22
2.1.6.3. 动刚度	22
2.2. 不平衡	23
2.2.1. 定义与说明	24
2.2.2. 盘形转子的不平衡	26
2.2.3. 一般转子的不平衡	28
2.2.4. 静不平衡	29
2.2.5. 力偶不平衡	31
2.2.6. 准静不平衡	33
2.2.7. 动不平衡	34
2.2.8. 不平衡状态的图示	34
2.2.9. 不平衡的原因	38
2.2.10. 不平衡效应	38
2.3. 平衡	40
2.3.1. 判断标准	40
2.3.1.1. 转子质量和许用剩余不平衡	40
2.3.1.2. 工作转速和许用剩余不平衡	41
2.3.2. 平衡精度分级	41
2.3.3. 刚性转子的分类	42
2.3.4. 所要求的平衡精度的实验测定	45
2.3.5. 校正单面的转子	45
2.3.6. 两个校正面的转子	46
2.3.6.1. 校正平面间距很大的转子	48
2.3.6.2. 校正平面间距很小的转子	50

2.3.6.3.外盘转子	50
2.3.7.不带轴颈的零件	53
2.3.7.1.转位 180° 的平衡	56
2.3.8.部件	60
2.3.9.剩余不平衡的求算	62
2.3.10.所达到的平衡精度的求得	64
2.3.11.不平衡状态的控制	65
2.4.挠性转子	66
2.4.1.塑性转子	66
2.4.2.体弹性转子	66
2.4.3.轴弹性转子	67
2.4.3.1.理想的轴弹性转子	68
2.4.3.2.支承刚度的影响	68
2.4.3.3.固有频率与临界转速	70
2.4.3.4.一般轴弹性转子	71
2.4.3.5.轴弹性转子的平衡	71
2.4.3.5.1.双节点振型	73
2.4.3.5.2.三节点振型	73
2.4.3.5.3.四节点振型	74
2.4.3.6.挠性转子平衡法	75
2.4.3.7.辅助方法	76
2.4.4.分类和平衡方法	77
2.4.4.1.平衡方法说明	80
2.4.5.不平衡允差	84
2.4.5.1.许用振动值	85
2.4.5.2.许用不平衡	87
2.4.5.3.等效剩余不平衡的计算	88
3. 平衡技术的实践	89
3.1.平衡机和重力平衡机	89

3.1.1.卧式平衡机	89
3.1.1.1.平衡的要求	89
3.1.1.1.1.转子类型的描述	89
3.1.1.1.2.附表	91
3.1.1.1.3.极限数据	91
3.1.1.1.4.转子的附加说明	91
3.1.1.1.5.其它条件	92
3.1.1.2.技术参数和技术文件	93
3.1.1.2.1.转子重量和不平衡量的极限值	93
3.1.1.2.2.生产率	93
3.1.1.2.3.不平衡减低率	93
3.1.1.2.4.转子尺寸	93
3.1.1.2.5.轴颈范围	95
3.1.1.2.6.平面分离	95
3.1.1.2.7.传动装置	96
3.1.1.2.8.制动装置	96
3.1.1.2.9.按 VDE 标准的电机和电机控制装置	96
3.1.1.3.技术细则及其评述	97
3.1.1.3.1.传动装置	97
3.1.1.3.2.指示仪表	101
3.1.1.3.3.传感器	104
3.1.1.3.4.制动装置	105
3.1.1.3.5.测量装置的调整	105
3.1.1.3.6.机器基础	106
3.1.1.3.7.最小可达到的剩余不平衡(KER)	107
3.1.1.3.8.转子支承轴承	108
3.1.1.3.9.惯性矩、循环次数	108
3.1.1.3.10.测量方式	109
3.1.1.3.11.试验转子及试验重量	110

3.1.1.3.12. 超载	114
3.1.1.3.13. 环境条件	114
3.1.1.3.14. 不平衡减低率(URV)	114
3.1.1.3.15. 生产效率	114
3.1.1.4. 最小可达剩余不平衡的测试(KER)	115
3.1.1.5. 不平衡减低率的测试(URV)	117
3.1.1.6. 挠性转子用的平衡机	121
3.1.2. 立式平衡机	121
3.1.2.1. 转子数据	121
3.1.2.2. 技术参数和技术说明	122
3.1.2.3. 技术数据及其评述	122
3.1.2.4. 最小可达剩余不平衡的测试(KER)	124
3.1.2.5. 不平衡减低率的测试(URV)	124
3.1.2.6. 力偶不平衡影响测试	125
3.1.3. 重力平衡机	125
3.2. 不平衡的校正	126
3.2.1. 校正误差	126
3.2.2. 校正方式	129
3.2.2.1. 材料加重	130
3.2.2.2. 材料移位	130
3.2.2.3. 材料去重	130
3.2.3. 校正时间	131
3.3. 工件的装卸	132
3.4. 平衡的准备工作	134
3.4.1. 设计原则和绘图说明	134
3.4.2. 平衡工作计划	134
3.4.3. 转子准备工作	138
3.4.4. 在生产上的平衡	140
3.5. 一般须知	140

3.5.1. 转子不稳定性对平衡精度的限制	140
3.5.2. 平衡时的机械误差	142
4. 现场平衡	143
4.1. 现场平衡时的问题	143
4.2. 测量仪器	144
4.3. 现场平衡理论	145
4.3.1. 单面现场平衡	146
4.3.2. 双面现场平衡	147
4.3.3. 多于两个平面的现场平衡	148
4.3.4. 现场平衡的先决条件	150
4.4. 现场平衡的实践	150
参考文献	151
附录一 平衡技术的术语与定义	152
附录二 (国际标准 ISO1940) 旋转刚体的平衡精度	196
附录三 (国际标准 ISO2953) 平衡机的说明与评价	211
附录四 使用者应向平衡机制造者提供的资料	240
附录五 定义	244
词汇表	246

1. 导 言

今天，在几乎所有的转子中，平衡工艺被看成是绝对必要的，以延长机器的寿命，改善其性能，得到平稳无振动的运转，保证用户满意。

虽然许多有关人员都确信“平衡”工序的必要性，但它却很少被合适地纳入生产过程的规划中去。除大批生产外，大多数情况下平衡工序被看成是不可避免的，凡是涉及的地方，都会造成增加不必要的费用。

对于其它工序，如车削，常常是事先规定好工具机床、工件夹头、车刀、切削速度、进刀量、切削深度和工时，而对平衡工序，则大都把这一切交给平衡机操作者或工段长，他们只根据经验决定应该做什么和怎么做。

正因如此，尽管工程技术人员近二十年来作了许多情报和标准化工作，在这个领域做出了成绩，但平衡技术的基本知识直到今天还未普及。

可以说，没有哪一位有经验的设计师在设计机器零件时，而不考虑生产可能性和不规定确切公差的。尽管平衡过程这一重要步骤在设计时就已经作了规定，但实际上，平衡工序常是一个例外。

同样还有一些待于弄清的问题，如，什么样的平衡机最有效，各种不同的平衡问题又怎么才能最好地加以解决等。

本书有助于了解平衡技术，并给工厂中的实践者解决各种平衡问题予以指导。

1.1. 平衡技术的发展

由此可知：“平衡”工艺这个课题是随着转动机器的出现（即快速旋转的机器）而提出的，并且随着汽轮机、发动机、电动机、离心泵以及压缩机的出现而变得越来越突出。设计上事先确定的质量对称已无济于事；旋转必须在刀口或滚子上凭技巧和经验进行静平衡，并经常在运转状态中还要继续加以校正，以达到平稳和无振动地运转。

有关平衡机的第一个专利是 1870 年（即西门子公司发明发电机的四年之后）马丁生（Martinson）在加拿大提出申请的。见图一。这显然只是平衡机的模型，还不符合工业上的意义。在上世纪末到本世纪初的时期，平衡技术获得了美国的阿基莫夫（Akimoff）和瑞士的斯托多拉（Stodola）的新推动，但直到 1907 年方由达姆斯塔特（Darmstadt）市的拉瓦茨克（Lawaczek）提出双面平衡机的专利申请，并经过改进，在卡尔、申克厂制造才付诸工业使用。

今天在这里和那里还可以见到，且还在使用的二十年代的机器。虽然还可被认为是平衡机，但它们与现代的平衡机几乎没有什么共同之处。虽然当时转子也必须放进轴承架，并加以驱动（基本上与今天所用的部件相同），但电气测量技术还很不成熟；当时人们仅依靠纯机械的测量工具供工业上使用。为了提高测量灵敏度，曾在超共振运转后再降至共振转速的谐振中进行测量，这样，才获得比较良好的频率选择性。但是，关于角度位置，开始只能凭揣测而定，而所要求的校正平面（平面分离）测量值的精确配置也还不可能。在以后的几十年中，随着新概念和专利的充实，机器得以完善和改进。各种改进型号和全新的系统得到了发展。当时的基

本观点是提高经济性，首先是缩短工时。整个费用在当时必须花费在机械制造方面。这种情况一直到引入机电测量变换器才有所改变；第二次世界大战以后随着电子测量技术的迅速发展，有了根本的改变。随着测量设备的进步，平衡机的机械结构又变得更简单，而且除特殊机器之外，又回到早些年的一目了然的制造方式上。灵敏度，频率选择、平面分离等全部任务现在都由测量设备来承担了。

1.2. 标准化工作

获得统一标准的初步努力在于判断机器的振动。五十年代中期，德国工程师协会振动技术专业小组的工作委员会开始了一项工作，在德国工程师协会 VDI-2056 规范《机器机械振动的判别标准》〔1〕中有其结果。在确定标准(有效速率)方面，人们重视美国人耶特斯(Yates)和雷斯朋(Rathbone)在第二次世界大战以前所做的工作以及五十年代初期所建立的美国标准，并通过详细计算发动机和工作机械的生产厂和用户的经验资料，确定了主要机组的振动强度等级。

在这个德国工程师协会 VDI-规范的基础之上，形成了若干德国工业标准——DIN 标准，其中主要的是，德国工业标准 DIN-45665《尺寸为80~315的电机振动强度》〔2〕和德国工业标准 DIN-45666〔3〕，后者中已经详细规定了振动强度测量装置的规格要求。

评价转子平衡状况的工作于 1960 年开始，结果导致制定了德国工业标准 VDI2060《旋转刚体平衡状况的判断标准》〔4〕。

德国工程师协会把这两个 VDI-规范作为建议递交给国际标准化组织的秘书处。德国工程师协会 VDI-2056 规范决定

性地影响到国际标准化组织 ISO-2372 规范《工作速度为10~200转/秒的机器的机械振动——规定评价标准的基础》〔5〕，德国工程师协会 VDI-2060 规范曾是国际标准化组织 ISO-1940 规范《旋转体的平衡精度》〔6〕的重要基础。

国际标准化组织制订的 ISO-1925 规范《平衡术语》〔7〕

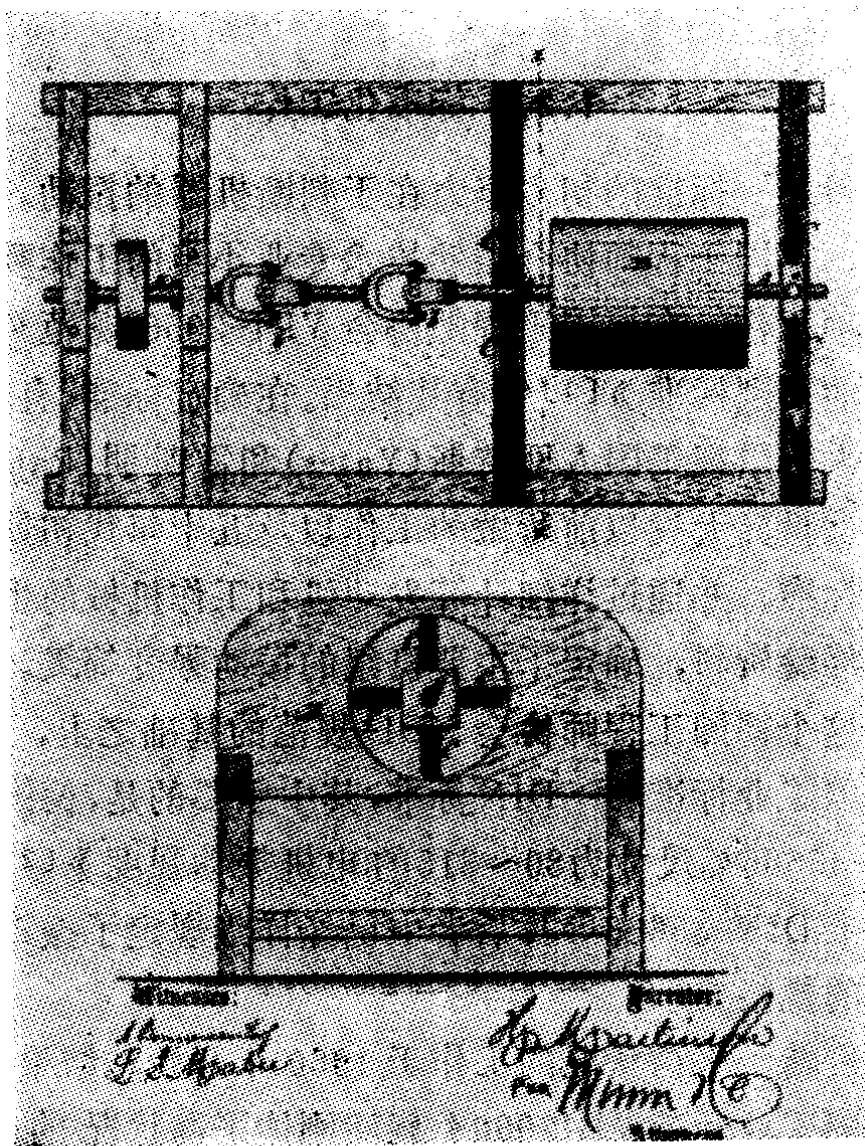


图1 马丁生 (Martinson) 专利, 估计是平衡机的第一个专利