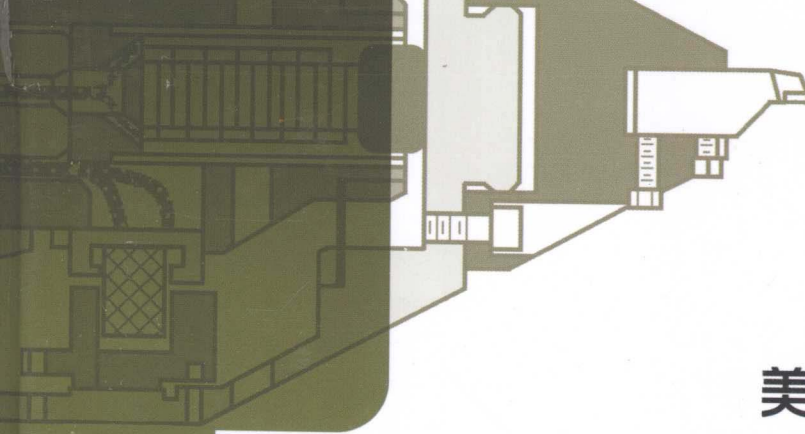




经典之作
美国麻省理工学院
MIT优秀课程用书

传授知识 · 启迪智慧 · 激励创新

精密机械设计

Precision Machine Design

[美] 亚历山大 H. 斯洛克姆 (Alexander H. Slocum) 著
王建华 等译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



Precision Machine Design

精密机械设计

[美] 亚历山大 H. 斯洛克姆 (Alexander H. Slocum) 著

王建华 等译

曹 岩 主审

机械工业出版社

本书既有先进的基础理论体系,又特别重视工程实际,是精密机械领域一部传授知识、启迪智慧、激励创新的经典之作,是美国麻省理工学院公开课程的指定用书。

本书将精密机械作为一个各个部件之间相互协作的集成系统,重点放在精密机械零件的机械结构设计及其与传感器和控制系统的集成,以达到系统性能最佳;在设计中,强调设计将如何影响整个系统的精确度、重复性和分辨率;提供了许多具有创造性的设计案例。

全书共包括10章:第1章精密机械设计概论,第2章精确度、重复性与分辨率的原理,第3章模拟传感器,第4章光学传感器,第5章传感器的安装与校准,第6章车削中心几何误差与热误差,第7章系统设计注意事项,第8章接触式轴承,第9章非接触式轴承,第10章驱动与传动。

本书适合作为机械工程、仪器科学与技术领域研究人员和工程技术人员随查随用的参考书,也适合作为该专业领域的研究生或高年级本科生的教材。

PRECISION MACHINE DESIGN/ Alexander H. Slocum / ISBN: 978-0-87263-492-3

Copyright © 2008: Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Michigan, USA

This title is published in China by China Machine Press with license from Society of Manufacturing Engineers. This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong SAR, Macao SAR and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书由 Society of Manufacturing Engineers 授权机械工业出版社在中国境内(不包括香港、澳门特别行政区及台湾地区)出版与发行。未经许可之出口,视为违反著作权法,将受法律之制裁。

北京市版权局著作权合同登记 图字:01-2011-6285号。

图书在版编目(CIP)数据

精密机械设计/(美)亚历山大·H.斯洛克姆(Alexander H. Slocum)
著;王建华等译. —北京:机械工业出版社,2017.4

书名原文: Precision Machine Design

ISBN 978-7-111-56581-9

I. ①精… II. ①亚… ②王… III. ①机械设计-高等学校-教材
IV. ①TH122

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第075335号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:李万宇 责任编辑:李万宇 安桂芳 程足芬 李超

责任校对:刘志文 刘雅娜 封面设计:鞠杨

责任印制:常天培

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

2017年7月第1版第1次印刷

184mm×260mm·40.75印张·2插页·1134千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-56581-9

定价:168.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88361066

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-68326294

机工官博:weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网:www.golden-book.com

封面防伪标均为盗版

教育服务网:www.cmpedu.com

译者序

本书是亚历山大·亨利·斯洛克姆花费四年时间完成的一部力作。期间得到麻省理工学院、美国国家科学基金会、橡树岭大学联盟、英国皇家学会和美国国防部等机构的十多项基金和研究计划的资助。本书既有先进的基础理论体系，又特别重视工程实际，是精密机械领域一部传授知识、启迪智慧、激励创新的经典之作。自从1992年出版以来，多次重印，在美国、英国和我国台湾地区一直作为研究生或高年级本科生的教材。

目前国内外有许多优秀的机械零件设计教材，本书假设读者已经熟悉相关概念，在此基础上，将精密机械作为一个各个部件之间相互协作的集成系统，重点放在精密机械零件的机械结构设计及其与传感器和控制系统的集成，以达到系统性能最佳。在设计中，强调设计将如何影响整个系统的精确度、重复性和分辨率，并提供了许多具有创造性的设计案例。本书作为麻省理工学院“公开课程”的指定教材，在教学理念、内容组织方面，对我国相关学科专业的教学改革都具有很好的借鉴价值。翻译出版此书不仅引入了一本教材，而且引进了麻省理工学院精密机械设计课程的课程体系，故具有非常重要的价值。

全书共包括10章：第1章 精密机械设计概论，第2章 精确度、重复性与分辨率的原理，第3章 模拟传感器，第4章 光学传感器，第5章 传感器的安装与校准，第6章 车削中心几何误差与热误差，第7章 系统设计注意事项，第8章 接触式轴承，第9章 非接触式轴承，第10章 驱动与传动。

本书适合作为机械工程、仪器科学与技术学科专业的研究生或高年级本科生的教材，也适合作为该领域科学工作者和工程技术人员的参考书。

本书的翻译得到了“西安工业大学精密测量与控制技术科研创新团队建设”项目支持。全书译文由王建华教授负责组织翻译、安排与统稿，曹岩教授主审并负责全书中图表的翻译和处理。其中，第1章由王建华教授翻译，第2章由唐博博士翻译，第3、4章由张培培博士翻译，第5、6章由张国锋博士翻译，第7章和第8章1~3节由彭润玲博士后翻译，第8章4~8节由李刚博士翻译，第9、10章由赫东锋副教授翻译。

由于时间及译者水平所限，错误之处在所难免，希望读者不吝指教，译者在此表示衷心的感谢。

译者



原版书前言

历史已经证明：精密机械是工业社会的基本要素。事实上，从集成电路制造，到光学零件加工，再到汽车生产，现代工业高度依赖于精密机械。鉴于目前已经有许多优秀的机械零件设计教材，本书假设读者已经熟知相关概念。精密机械是一个各部件相互协作的集成系统，因此，本书侧重于精密机械部件的结构设计，以及精密机械部件与传感器和控制系统的集成优化设计。在部件设计的论述中着重探讨设计是如何影响机械的整体精确度、重复性以及分辨率等内容。

任何一本教材都不可能涵盖机械、传感器及控制系统等设计的全部内容。本书主要涉及精密机械部件及设备的集成设计。对传感器和控制系统则先介绍其基本工作原理，然后通过实例给出市面上常见传感器的特性，而控制系统的设计主要讨论控制单元的选取及其对机械可控性的影响。

设计是分析与创新的结合，本书旨在为读者提供清晰的理论背景和试验方法。在以往的设计类课程的教学中，我常常因不得不为学生们的课程设计准备足够的参考资料目录而感到苦恼；反过来，站在学生的角度，设计时又常常因为没有所需的资料目录而耽误设计方案的顺利完成。因此，在本书的设计实例中，给出了许多作者认为相当有用的市面上常见零部件的性能参数。以后，如有新的应用实例，我也很乐意采纳。

本书第1章从精密机械设计的基本原理入手，以精密机床和坐标测量机为设计案例进行深入探讨。第2章详细讨论了机械误差的物理原理，以及如何将这些知识运用于机械误差分配中。第3章和第4章分别介绍了在精密机床上应用的各种类型的模拟传感器和光学传感器¹。第5章讨论了传感器安装方法。第6章给出了机床几何误差和温度误差的详细案例研究。第7章讨论了系统设计的注意事项。第8章和第9章分别讨论了机床上常用的各种类型的直线和旋转轴承，重点放在轴承的基本特性及其在机械系统中的动力学行为。第10章介绍如何定义驱动机构的需求，并且详尽介绍了精密机械系统中常用的各种类型的直线和回转驱动器以及传动装置。

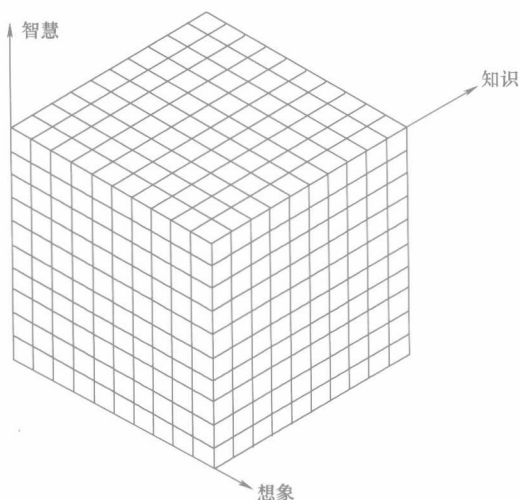
本书可作为高年级本科生及研究生的设计类课程教材，并且可供工程技术人员参考。作为教材，本书假定学生已具备了学习能力，能够就书中提及的一些不熟悉的概念进行深入研究。在许多方面，这样的设计书是首次出版，因此对工程技术人员来说也极具参考价值。在很多情况下，书中给出了公式的详细推导过程，以助于读者更深入地理解问题的本质。这些公式的应用都以电子数据表的形式进行了说明。

为什么学生们要学习成为设计工程师呢？看看你周围的那些缺乏营养、缺少关爱的孩子，能够帮助他们的资源，只有通过提升自然资源的价值来获得。这也就意味着，我们需要新的

¹ 第3章和第4章按照字母顺序介绍传感器，而不是按照工作原理（如感应的）进行介绍，因为我询问的现实世界的工程师更喜欢这种方式。最终，信息内容是相同的。欢迎读者对此提出意见。



产品，进而产生许多就业机会，以帮助他们摆脱贫困。一旦有了产品需求，就需要制造出来，这样会创造出更多的就业岗位。我们需要人设计出满足人们需求的产品，我们需要人解决新产品的生产、分配、销售以及售后服务问题，这将创造出更多的就业机会。我的目标是帮助人们去发现如何才能更好地使用自己的头脑，并使他们能够用自己的头脑去帮助别人。



将你的大脑想象成为一个大型的能够储存信息的立方体的三维阵列，随着时间的增长，这种储存信息的立方体数量也随之增加。例如，一旦读者从书本上了解到一种新型轴承，该信息将被存放在知识立方块中，使用轴承的新方法或许会存入想象立方块中，之前的关于轴承的经验或许会存入智慧立方块中，你可以随机地或者系统地搜索这一立方体阵列，从而找到解决问题的方法。在寻找解决问题的过程中，你常常发现已有的立方体并不包含所需的内容，这样，便会促使你去创造发明。

希望这本书能够帮助读者充实自己的立方体，并学会更加有效地、更加富有想象力地、更加聪明地运用这些立方体，这是一个世界公民的责任。倘若不能充分利用你的大脑，岂不是白白浪费了你的天赋。

本书花费了四年时间写成，期间得到了许多人和公司的支持，详见致谢部分。本书经过认真校对，以尽量避免出错²，但同时也欢迎读者指出错误，以便日后印刷时得以修正。十分欢迎读者对教材提出修改意见，包括添加新的内容。学生用的习题集将另外结集成册，同时，欢迎读者补充新习题。

亚历山大·亨利·斯洛克姆
机械工程系
麻省理工学院
马萨诸塞大街 77 号
剑桥，马萨诸塞州 02139

² 对于因利用本书信息而造成的损失，作者、编辑、出版社、赞助商或机构不承担任何责任。一名优秀的工程师将会反复校验信息，特别是应用于那些具有危险性的设计时。

目录

译者序	
原版书前言	
第 1 章 精密机械设计概论	1
1.1 引言	1
1.2 经济学分析基础	2
1.3 项目管理：理论和实施	9
1.4 设计工程师应具备的素质	15
1.5 设计案例：高速加工中心（HSMC）	29
1.6 设计案例：三坐标测量仪	40
第 2 章 精确度、重复性与分辨率的 原理	52
2.1 引言	52
2.2 制订系统误差分配	55
2.3 准静态机械误差	71
2.4 动态力引起的误差	92
2.5 设计案例研究：丝杠调整不当引起的 支架直线度误差	94
第 3 章 模拟传感器	101
3.1 引言	101
3.2 非光学传感器系统	106
第 4 章 光学传感器	141
4.1 引言	141
4.2 自准直仪	141
4.3 光学编码器	145
4.4 光纤传感器	155
4.5 干涉传感器	158
4.6 激光三角传感器	183
4.7 光电传感器	184
4.8 飞行时间传感器	189
4.9 视觉系统	190
第 5 章 传感器的安装与校准	194
5.1 引言	194
5.2 传感器的定位	194
5.3 传感器的找正	198
5.4 传感器安装结构设计	199
5.5 传感器安装环境	202
5.6 曲面间的接触	203
5.7 测量构架	209
5.8 传感器校准	219
5.9 传感器输出和定位误差对精度的 影响	222
5.10 设计案例研究：激光遥测系统设计	224
第 6 章 车削中心几何误差与热误差	238
6.1 引言	238
6.2 Superslant™ 的齐次变换矩阵的建立	242
6.3 机床的测量	246
6.4 校准测量结果	251
6.5 测量误差补偿	259
6.6 误差补偿系统的实时实现	261
6.7 总结和结论	264
第 7 章 系统设计注意事项	266
7.1 引言	266
7.2 加工注意事项	267
7.3 材料	293
7.4 结构设计	300
7.5 连接设计	322
7.6 辅助系统	346
7.7 活动连接设计	354
7.8 设计案例：磨削大型离轴光学零件的 新型机床	363
第 8 章 接触式轴承	370
8.1 引言	370
8.2 滑动轴承	374
8.3 滚动轴承	391
8.4 旋转运动的滚动轴承	405
8.5 直线运动的滚动轴承	422
8.6 挠性轴承	459
8.7 限制轴承热效应的设计	474
8.8 案例分析：主轴运动误差测量	478
第 9 章 非接触式轴承	485
9.1 引言	485
9.2 液体静压轴承	485



9.3 气体静压轴承	508	10.4 有限行程电磁致动器	574
9.4 磁浮轴承	541	10.5 压电致动器	577
第 10 章 驱动与传动	553	10.6 流体传动系统	584
10.1 引言	553	10.7 旋转传动元件	592
10.2 元件的动态匹配	553	10.8 直线传动元件	606
10.3 线性和旋转伺服电动机	562	10.9 设计案例：通过控制提高轴向刚度 ...	640

第 1 章

精密机械设计概论

你为什么喜欢设计机器？因为设计机器是用你的智慧，驱使钢铁（金属或晶体）去做你想让它们做的事情。而你的成功，就是对你最好的奖励。

——阿尔伯特·迈克尔逊

1.1 引言

一个公司要在全球市场中保持竞争力，只能通过不断地开发新技术和新产品来保持领先地位，墨守成规是不可取的。因此社会需要有人设计出响应更快、更精确、更可靠的新机器。这就促使需要大量有深刻理解力，并且热爱设计科学和艺术的设计师¹。

从广义上来说，设计科学和艺术是一种有效的“维生素”，它还需要与其他“营养”结合来保持平衡，如数学、物理、制造学、实践经验以及商业技能等。许多人通过体育锻炼保持身体健康，提高每天生活的乐趣。与锻炼身体类似，分析是一种“精神俯卧撑”，使人们的头脑变得更灵敏、更有效。确实，如果设计师不能理解新产品设计背后的基本原理，就设计不出新产品。相反地，了解产品的制造工艺就能使设计师开发出便于使用、容易制造的产品。如图 1.1.1 所示，随着多学科融合，要求当代设计师必须具备多才多艺的素质。成功的设计师必须比他的竞争对手更具有创新能力和对周围世界细致入微的观察能力。身处当今这个

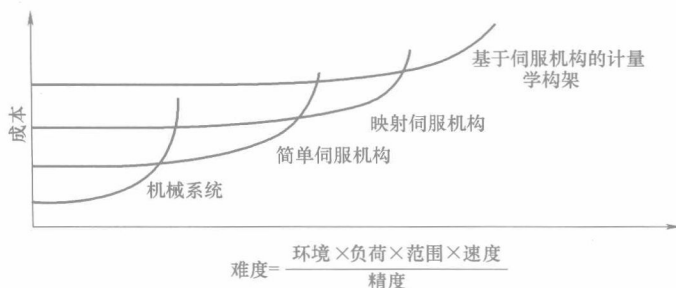


图 1.1.1 持续增长难度通常引发多个工程领域学科的集成

¹ “热情是成功的原动力。当你做一件事时，应尽你最大能力，全心全意投入，充分彰显你的个性。积极、有活力、热情、真诚，你将事业有成，失去热情，一切将变得平庸无味。” 拉尔夫·沃尔多·爱默生



竞争激烈的世界，无论你想要什么，都只能用血汗、泪水和设计来获取。

未来，专家系统或许能承担一般性工程任务。然而，计算机不可能做出具有创造性的设计。如果一个计算机程序可以进行创造性设计，那么它也就可以完成它自身的程序设计。因此，社会总需要具有创造性的设计师。那些缺乏创造力和分析能力的学生将无法获得高薪酬的工作²，而那些聪明、有创造力、勤奋工作的设计师则前途光明。怎样教导年轻的设计师学会思考，使他们变得具有创造力呢？把理论与实践相结合应该是一种好方法，这将在以后的章节再次强调说明。本章主要讨论的问题包括：

- 经济学分析基础。
- 设计哲学。
- 工程管理技术基础。
- 现实世界的设计过程。

1.2 经济学分析基础³

机器的初始规格通常由能够反映顾客需求的公司销售人员制订。然而，顾客都想要以尽可能低廉的费用获得强大的性能。罗列出顾客需求后，设计师的职责就是草拟出能够满足顾客要求的多个可选设计方案和费用估算。这一步骤通常由高级设计师和制造工程师完成，因为他们在确定设计和生产一件新产品所需要的时间和费用上较有经验。

经济学分析的潜在原理是资金的价值依赖于获得或花费资金的时间。最简单的例子是：在一个传统的银行储蓄账户以 6% 的利息存入 \$1000，五年后大约为 \$1349。如果 6% 的利息是所能获得的最高利息，那么今天的 \$1000 与五年后的 \$1349 相当。由于在将来某个时间得到或花费的资金，其价值不同于今天的价值，所以经济学分析对于购买机械设备的决策很重要，进而影响机器的设计。应该强调的是有很多方法评估投资决策，由于本节只是简要介绍，没有进行更详细的讨论。建议每一位工程师在他们的职业生涯中，都应该学习一门工程经济学课程。

1.2.1 现金流量时间图

投资评估的第一步是确定相关的现金流量，以及预计产生这一费用的时间。在时间轴上记录现金流量是一个方便的现金流量图示方法。

例 1

一台自动钻床购买价格是 \$15000。通过用新钻床代替旧钻床，预计公司将在劳动力花费上每年节省 \$900，但是每年会产生额外的 \$100 维护费。那台旧钻床现在能卖 \$500，新钻床 8 年后的残值估计为 \$6000。图 1.2.1 表示时间函数下的相关现金流量。在给定年份从“现金流入”中扣除“现金流出”得到的就是净现金流量时间图，如图 1.2.2 所示。这个时间图显示从第一年 ($t=0$) 开始，公司有 \$14500 的净负现金流量。在 1~7 年中，每年有 \$800 的净正现金流量，第 8 年从设备出售和当年收益中获得 \$6800 的正现金流量。为了回答“公司应该买新的钻床吗？”这个问题，需要评估预测的现金流量，同时还需要考虑复利因素。

² “真理是我一生的信仰，我全心全意地追求。不管是过去、现在、还是将来，真理永远都是美丽的。”列夫·托尔斯泰

³ 第 1.2 节由 Richard W. Slocum III 撰写。



1.2.2 复利因素

资金的时间价值可看作利息和复利。运用下面的数学因子和公式，可以计算出各种类型现金流量在不同时间的价值。其中： i 为每个周期的利率（如 $i=0.1$ ，利率为 10%）； n 为周期数。

一次支付终值因子：给出现时（ $t=0$ ）现金流量在未来 n 个周期后的值

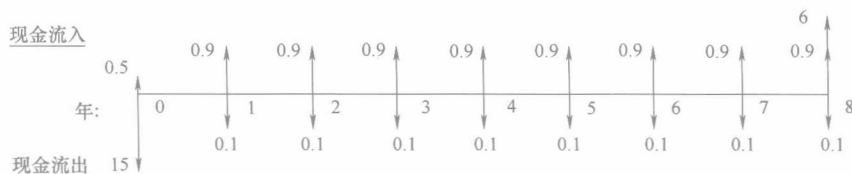


图 1.2.1 例 1 的现金流量（千美元）时间图

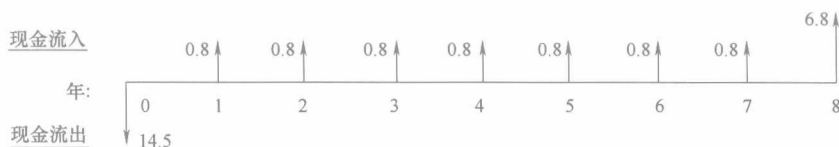


图 1.2.2 例 1 的净现金流量（千美元）时间图

$$(F/P, i, n) = (1+i)^n \quad (1.2.1)$$

一次支付现值因子：给出未来 n 个周期后的现金流量的现时（ $t=0$ ）的值

$$(P/F, i, n) = \frac{1}{(1+i)^n} \quad (1.2.2)$$

等额分付终值因子：给出每个周期发生一次的等额现金流量的终值（未来 n 个周期后）

$$(F/A, i, n) = \frac{(1+i)^n - 1}{i} \quad (1.2.3)$$

等额分付现值因子：给出每个周期发生一次的等额现金流量的现时（ $t=0$ ）的值

$$(P/F, i, n) = \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \quad (1.2.4)$$

资本回收因子（CRF）：给出与现时（ $t=0$ ）一次现金流量等值的，未来 n 个周期分次发生的等额现金流量

$$(A/P, i, n) = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (1.2.5)$$

本金和资本回收因子（CRF）的乘积为分期付款额。资本回收因子可以用来计算偿还汽车贷款或住房抵押贷款的每期付款额。

偿债基金因子：给出与 n 个周期后一次大额现金流量等值的，未来 n 个周期分次发生的等额现金流量

$$(A/F, i, n) = \frac{i}{(1+i)^n - 1} \quad (1.2.6)$$

由于这些公式太过冗繁，过去人们按照各种利率和时间周期将他们制成了表格。现在，可编程的财务计算器和以个人电脑为基础的财务软件的应用，使这些计算变得更加简单。

例 2

弗雷德想要借 \$12000 去申请买一辆新车。如果银行提供五年贷款，年利息是 12%，弗雷



德每月将偿还多少钱？这就用到了资本回收因子。一期是 1 个月，5 年共 60 期，每期利息是 12% 除以 12 个月，即 1%，则月偿还额 $= (A/P, 1\%, 60) \times \12000 。 A/P 因子是 0.02224，因此，弗雷德每月偿还额是 \$266.88。

例 3

玛丽现在是一名大学二年级的学生，她准备开始一项每月存款计划，这样将积攒足够的钱在毕业时能首付购买一套住房。她离毕业还有 29 个月，估计需要 \$11000 的首付。如果存款利息保持在 6%，她每月应存多少钱？这里用到了偿债基金因子。这个例子有 29 期，每期利息是 6% 除以 12 个月，即 0.5%，则需要的月存款 $= (A/F, 0.5\%, 29) \times \11000 。 A/F 因子是 0.0321，因此，玛丽应该每月存 \$353.10。

1.2.3 项目的经济分析

如例 1 的时间图所示，一段时期内的现金流量能否达到公司的投资标准，需要通过项目的经济评估来确定。通常，一个公司的管理层要确定投资所应该获得的最小利润率，以便考虑投资是否值得⁴。一般来说，这种最小利润率应在政府的长期债券利率（政府债券实际上是无风险的）的基础上，再加上风险系数。例如，无风险的政府债券收益率是 9%，那么，除非一个项目能在政府债券收益率的基础上产生额外（如 3%）的收益率来补偿增加的风险，否则，没有一个公司会投资给这样一个高风险项目。此例中，管理层设定的最小利润率应该为 12%。以下几个术语也表示最小利润率：

- 期望（最小）收益率。
- 最低预期资本回收率。
- 贴现率。
- 期望（最小）收益。

所有这些术语都和上面提到的利率 i 有关。

评估一组现金流量能否达到预期的最小利润率，主要有下述两种方法：

1) 由现金流量计算利润率，然后与最小利润率比较。利润率的计算首先用适当的因子 (P/A 、 A/F 等) 建立可用现金流，然后，列出所有现金流量（流入、流出）的求和方程，从中求解出利润率 i ： $PW_i = 0$ = 以利率 i 贴现的现金流量总和。

2) 用最小利润率计算现金流量的现值，来折扣未来时间周期发生的现金流量。这种分析要计算投资的现值，用 PW_x 表示，其中 x 是最小利润率（或称贴现率）的百分数。如果 PW_x 为正，表示计划的投资利润率大于设定的最小值；如果 PW_x 为负，表示计划的投资利润率低于设定的最小值。

因为利润率 i 的计算是一个重复迭代的过程，许多情况下需要耗费大量时间。 PW_x 的计算相对直接，可以快速确定一项投资计划可行或不可行。

例 4

例 1 中的公司管理层对所有项目设定的最小利润率为 12%。那么，新钻床该买吗？首先，建立图 1.2.3 所示的方程式。为方便起见，用负数表示公司的现金流出量，用正数表示现金流入量。由于 PW_{12} 的结果为 $-\$8102$ ，是负数，达不到公司所要求的投资标准，因此，计划的新钻床不应购买。有许多投资决策类似于前面的例子，准确的投资分析关键在于正确地确定计划投资可用的现金流量。

$$PW_{12} = -\$14500 + \$800 (P/A, 12\%, 7) + \$6800 (P/F, 12\%, 8)$$

$t=0$ 时没有乘数 P/A 给出了 1~7 P/F 给出了第 8 年
 年现金流的现值 现金流的现值

图 1.2.3 例 4 的现值计算

⁴ 该方法的隐含缺陷在于它没有考虑质量、员工和顾客满意度的影响。



1.2.4 机器成本的确定

现在不乏设计先进、技术完美的机器，但是，只有那些成本低、效率高的机器才能获得市场成功⁵。任何设备的成本都由以下两部分组成：固定成本和可变成本。固定成本是指因设备存在而持续存在的成本，不考虑设备是否在生产产品。固定成本包括备件库存成本、固定维修成本和空间占用成本。可变成本是与产品生产数量直接相关的成本，包括原材料、劳动力、大部分维修成本和设备消耗（如电能）。比较多个可选设备的方法是简单的数学运算，由各种成本因素的加、减、乘得到。问题难点在于确定哪种成本因素与给定工况相关，并对生产率、工资、利率、税制等给出符合实际的预测。

1. 初始的资金支出

初始的资金支出是指将机械设备投入使用的前期费用。需要考虑的前期费用很多，其中不少费用在最初的设计阶段容易被工程师们忽略。然而，这些实际费用将被潜在用户考虑。初始的资金支出包括：

- 机器自身成本。
- 运输和吊装费。需要注意的是，如果机器尺寸过大，不能用标准卡车装运，将产生较多额外运输费用。
- 备件库存费用。
- 操作和维护机器的员工培训费。
- 厂房的改造费，如进行动力源和结构改造以适应质量、尺寸、振动、噪声等要求。

了解这些因素可以帮助设计工程师减少设备的相关成本。大多数情况下这样做不会改变机器的基本设计，也不会增加成本。例如，以创新方法设计一台高速工作的大型电动印刷机，设计工程师可以：

- 把机器设计为几个可分离的主要部件，容易运输和安装。
- 选用其他同类机器使用的齿轮箱、电动机和其他通用部件。使得用户不必建立新的机器备件供应链，同时减少用户维修技工的培训费。例如，通过调研发现75%的印刷机使用“X”牌电动机和“D”牌控制器。那么，新设计的机器也这样选择，就会有优势。除非有充足的技术或经济原因，才会选其他品牌部件。
- 选用与其他同类机器相似的控制逻辑系统，若无充足的技术或经济原因，不要选用其他类型，这将减少机器操作者的培训费。
- 合理设计部件布局，便于维护，操作舒适、安全。

在上例中，通过实施上述建议，成本可能很小，由此可能设计出一台更经济的机器。相比较，一台需要加宽卡车来运输的印刷机，配备了具有许多难以找到的电动机和齿轮箱，而且它的操作控制系统不同于其他大多数同类机器，这样的机器成本会大大增加。

2. 固定维护费

固定维护费是指不依赖于生产量的机器维护费用。例如，如果润滑油必须“每月或250h工作时间”更换一次，假设机器每周工作五天，单班工作制，此项费用便是固定维护费。对于经常使用的机器，其固定维护费一般没有可变维护费高。对于主要作为备用的机器，如紧急发电机和其他备用系统，固定维护费就比可变维护费高。

3. 可变维护费

可变维护费直接取决于机器的使用量。像传送带、切削刀具和电动机电刷的更换便是典型的可变维护费用。在上段例子中，如果假设机器的使用为每天两班制（双班制），更换润滑

⁵ “母鸡只是一个鸡蛋制作另一个鸡蛋的方式”。塞缪尔·巴特勒。



油的费用就变成了可变维护费。

4. 资产折旧费

随着机器的使用，其会磨损并丧失价值。折旧是用来表示每年磨损费用的一个会计术语。值得注意的是从现金流量观点来看，公司一般是在购买设备时花费现金。另一方面，折旧费的提取发生在称之为回收期⁶的那些年份。实际上，由于折旧费的提取不是实际的费用流出，这些年份每年都有现金流。相反地，折旧费提取减少了公司的纳税额，减少量等于折旧费提取乘以该公司的边际税率⁷。精确计算在给定年份中，提取折旧费的方法很多。为简单起见，这里只考虑常用的直线法。直线法假设在回收期，机器每年的“磨损”（即折旧）程度等同。因此每年提取的投资折旧费等于。

$$\text{折旧费} = \frac{\text{最初的资金花费}}{\text{投资回收期}} \quad (1.2.7)$$

5. 废品率

因为废品率直接影响成本，当评估机器经济可行性时必须考虑废品率。一些潜在影响成本的因素有：

- 废品造成的材料浪费。
- 废品引起其他部件的损坏。例如，在一个安装微芯片的机械手中，夹子的位置误差就有可能损坏它所装配的电路板。如果电路板即将完工，损失就可能达数千美元。像透平转子这样的复杂部件，具有上百万美元的附加值。
- 废品造成的停工。一台独立车床，停机费用可能很少。但是，对于一条自动装配线，如果整个生产线必须停下来排除故障，停机费用将会很大。

机械设计工程师们必须清楚地意识到他们所设计的设备所应具备的操作性。

6. 连锁反应

考虑机器的维修期和操作性时必然要涉及厂内其他机器，以及这些机器之间存在的相互依赖关系。例如，如果工厂买了一台数控机床，每天能加工 1000 个零件，但工厂的仓库只能提供 500 件的库存，这样，就必须另外购买其他辅助机械和设备，所需费用就要算作新机床的使用成本。类似地，如果一台高价买回的新机器，几乎不需要维护，用它替换一台经常停机的旧机器来加工零件，但是生产线上其他机器的故障又会导致新机器被闲置。另外，如果一台新机器很便宜，但经常需要维修，这样就会由于不断造成生产停顿，而产生名誉损失，降低用户的购买意愿。

7. 其他税金考虑

几乎没有不考虑税金的投资决策。机器设计工程师在比较可选设计方案时应当考虑这些问题。一般而言，与税金相关的影响投资决策的因素有：

- 资产折旧进度表（回收期）。
- 投资税收抵扣。
- 各种税率。

美国联邦政府和国家税收权威组织经常会通过调节免税代码来推动社会变革，这种调节还在不断进行。机器设计工程师虽然不必是税收领域的专家，但是，通晓与资产投资相关的税收法规仍然是非常重要的。

1.2.5 机器操作工成本

确定“一个机器操作人员的相关费用是多少？”是一个非常复杂的问题，需要考虑工资成

⁶ 1987 年，美国联邦政府税法明确了不同投资类型的各种回收期。例如，大多数机械设备的回收期是 5 年；大多数商业建筑有 32.5 年的回收期。

⁷ 1987 年，美国联邦政府税法中规定公司利润超过 \$100000 时的边际税率是 36%。



本、技术支持人员和工作规范实施等因素。除了基本的小时工资外，一些很常见的费用有：

工资成本：通常分为两种，即税金（如社会保险金和失业保险金）和员工福利（如商业保险、带薪假、退休金和储蓄计划）。这些花费很大，而且工资成本与工人的基本小时工资相等的情况也不罕见。

工人效率：工人休息时间和其他非生产时期的费用必须在计算“每小时的成本”或“每小时的生产率”中反映出来。

技术支持人员：许多事例表明，必须获得其他人员的支持，机器操作工的工作成效才能得以发挥。例如，一台特别精密的机器，需要一个专业技师在旁边进行技术服务或机器调整。假设一名技师可为六台机器提供支持，这样该技师每小时费用的六分之一应该包括在机器的操作成本中。设计出可维护性好和可靠性高的机器能够降低此类成本，而且这样的机器有时会比其他生产方式更具有吸引力。

工作规程：多数情况下，工作规程限制了允许工人需要做的工作，特别是有工会的工厂。例如，不允许机器操作工自行调整所开机器上传动带的松紧。他必须从维修部门请技师来调整，结果导致不仅额外增加了技师的费用，而且增加了操作工等待技师前来工作的时间。为减少此类问题发生，机器设计工程师应尽可能减少机器的例行保养频次。

因此，工程师要确定劳动力成本必须考虑诸多因素。这个问题不像“操作者的小时工资是多少或他每小时能生产多少件产品”那样简单。当没有工人生产率的精确数据时，可利用各种标准的预算手册对生产率进行估算。

1.2.6 实例

设计一台机器的最终目标就是，根据现有机器或人员的相关成本设计一台可用较低成本完成相同工作的机器。下面的例子将描述各种成本因素如何影响机器的购买计划，以及忽视某些成本因素将如何导致错误的决策。

例 1⁸

Widget 金属加工公司目前有一些普通车床，他们签订了月生产 3000 个不锈钢耐酸螺旋瓶盖的合同，该合同保证客户在未来 5 年中每月订购 3000 个瓶盖。公司目前采用单班工作，每周 7 天，每年 50 周的生产模式。Nifty 机床公司，一个数控车床制造商，提供了一个设备采购计划以帮助 Widget 公司满足生产需求。Widget 公司的管理层制订了一个以 12% 贴现率为基础的投资方案。

Nifty 公司的销售工程师和 Widget 公司的工程师一起制订了表 1.2.1 所示的成本概要。暂时不考虑税金和公司的其他费用，Widget 公司是否应该购买一台新的 Nifty 车床？

表 1.2.1 Widget 的成本概要

项 目	现有车床	Nifty X100 车床	Zipmaster 车床
操作者每小时工资	\$25.00	\$25.00	\$25.00
每年检修费用	\$1500	\$7500	\$12000
日常检修费用	\$1000	\$2000	\$39000
日常检修次数	2000	5000	3750
每小时瓶盖生产能力	8	35	35
每个瓶盖的成本	\$3.69	\$1.19	\$1.88
每年瓶盖数	36000	36000	36000
设备成本	\$0	(\$490000)	(\$300000)
操作者培训费	(\$500)	(\$12900)	(\$10000)
备件成本	\$0	(\$40000)	(\$22000)
设备残值	\$5000	\$240000	\$190000

注：加括号的表示没有考虑税金的当前成本。

⁸ 此处 Widget, Nifty 和 Zipmaster 都是虚构的公司。



首先,要找出使用普通车床和使用 Nifty 车床生产一个瓶盖的可变成本差异。令 W_o = 操作者每小时工资, O_a = 每年检修费用, O_r = 日常检修费用, O_f = 日常检修次数, Q = 产能,即每小时生产的瓶盖数, C = 每个瓶盖的成本,则

$$C = \frac{W_o}{Q} + \frac{O_a}{Q \times 8h/d \times 7d/w \times 50w/a} + \frac{O_r}{O_f}$$

因此,对于旧车床

$$C_{old} = \frac{\$25}{8 \text{ 瓶盖}} + \frac{\$1500}{8 \text{ 瓶盖} \times 8 \times 7 \times 50} + \frac{\$1000}{2000} = \$3.6920/\text{瓶盖}$$

对于新车床

$$C_{new} = \frac{\$25}{35 \text{ 瓶盖}} + \frac{\$7500}{35 \text{ 瓶盖} \times 8 \times 7 \times 50} + \frac{\$1000}{5000} = \$1.1908/\text{瓶盖}$$

故而,使用新的 Nifty 车床,每个瓶盖可以节约 \$2.5012。这里,假设这两种机床的材料费和废品率相同,那么,Widget 金属加工公司每年额外的利润就是每个瓶盖 \$2.5012 乘以每年生产的 36000 个,约为 \$90043。为计算这种额外利润是否等价于最初必需的资金支出,可用贴现现金流量来分析。令 CF_x 为第 x 年的现金流量, $x=0$ 表示现时, PW_{12} 为 Widget 公司 12% 贴现率的现值。那么,对于新车床,

$$\begin{aligned} CF_0 &= \text{新车床成本} + \text{操作者培训成本} + \text{备件成本} \\ &= (-\$490000) + (-\$12900) + (-\$40000) = -\$54290 \end{aligned}$$

$$CF_1 = CF_2 = CF_3 = CF_4 = \$90041$$

$$CF_5 = \$90041 + \text{回收值} = \$90041 + \$240000 = \$330041$$

利用 1.2.2 节的公式有

$$\begin{aligned} PW_{12} &= CF_0 + CF_{1-4}(P/A, 4, 12\%) + CF_5(P/F, 5, 12\%) \\ &= (-\$54290) + \$90041(3.037) + \$330041(0.5674) = -\$82139 \end{aligned}$$

PW_{12} 为负,表明未达到 Widget 投资标准,新车床的购买计划不能通过。

例 2

Nifty 公司的销售工程师很不高兴,他们公司机器的前期费用确实高出了 Widget 公司所能接受的数值。Widget 公司的工程师随后与 Zipmaster 机械设备公司联系,他们了解到,除了表 1.2.1 中所列指标外,Zipmaster 公司机器的性能与 Nifty 公司相同。那么,Widget 公司会购买 Zipmaster 车床吗?用例 1 中相同的方法分析购买 Zipmaster 车床计划,Widget 工程师发现 PW_{12} 值是 \$11377,为正数,表明达到了 Widget 公司的投资标准,车床可以购买。

从例 1 和例 2 中了解到机械设计师经常要面临经济上的权衡。有意思的是,许多情况下,为使制造的机器更可靠、更耐用(体现在高的残值和低的维护费),会导致初始成本过高,以致无法销售。其实,资金的时间价值表明未来产生的维修费和收入,其现时值小于它们在未来实际收入和支出发生时的绝对数额。未来成本的计划期越长,对投资决策的影响就越小。但是,对于由多个机器组成的生产系统应该特别注意,如果一台机器停机,将会影响整个生产线的运行。在这些情况中,保证设备可靠性的成本花费是值得的。

机械设计师设计的机器要替代已有的机器或与它竞争,就必须认真调研、分析已有机器的设计资料。在 Nifty 车床的例子中,新机器生产力的提高尚不足以抵消它较高的初始成本。一个解决方案就是改变最初的设计来降低初始成本,甚至不惜以较高的维护费用为代价,可以推测 Zipmaster 公司就是这样做的。

例 3

我们假设 Nifty 的机器在美国生产,而 Zipmaster 的机器在欧洲制造。我们进一步假设 Widget 是一个盈利的公司,缴纳 42.5% 的边际税率(联邦、州和当地政府)。对于这个例子,



若税法明确国产机器的回收期和投资税收抵扣⁹分别是4年和10%，而进口机器是8年和0%。这将怎样影响 Widget 公司购买新车床的决策呢？对于 Nifty 机器，投资税收抵扣相当于立即享受设备购买价格10%的“折扣”，即 $\$490000 \times 10\% = \49000 。认定4年的回收期，政府实际上是允许 Widget 公司在4年内将 Nifty 车床全部折旧，这样，每年的应税收入减少了 $(\$490000 - \$49000)/4 = \$110250$ 。因为 Widget 公司缴纳42.5%的所得税，应税收入的“减少”导致每年的税金账单减少 $\$110250$ 的42.5%，即 $\$46856$ 。由于 Widget 公司实际上没有支付每年 $\$110250$ 的折旧费，实际效果是 $\$46856$ 的正现金流量。

利用税法规则，重新计算 Nifty 车床的 PW_{12} 得 $\$109180$ 。数据为正，表明 Nifty 车床也能满足 Widget 公司的投资标准。现在 Widget 公司的工程师面对的问题变为应该购买哪个车床。对 Zipmaster 车床也应该做类似的计算。由于税法规定对进口机械有不同的待遇，Widget 公司应税收入的减少量不大，重新计算的 PW_{12} 为 $\$68828$ 。现在，经济学表明买 Nifty 车床有较高的税后现值，Widget 的决定应该是购买 Nifty 车床。因此，税金产生的影响¹⁰在投资决策中起重要作用。特别是在将机械与劳动力比较时，税法通常给机械设备的投资有更多的经济优惠。

1.3 项目管理：理论和实施¹¹

一旦管理层和客户通过了新机器的概念设想，下一步就是制订一个详细的计划，来完成机器的设计¹²。在此，需要将项目管理工具与启发式设计方法相结合，以确保最终的设计能够满足客户的要求。

任何活动，不管其大小和复杂程度，实际上都离不开项目管理的应用。许多情况下，项目并不复杂，对它们的“管理”也应该胸有成竹。正式的项目管理涉及一系列技术，来计划和控制那些一个人无法处理的复杂项目¹³。一般来说，这些技术界定了组成项目的各项活动和这些活动之间的相互关系，给出了项目进行期间所发生活动的“路线图”，以及这些活动预期中发生的时间和顺序。目前项目管理已经有一些得到认可的方法，比较知名的方法有 CPM (Critical Path Method, 关键路径法) 和 PERT (Program Evaluation and Review Technique, 计划评审技术)。所有方法其基本概念都比较简单，但在过去，大量复杂的计算阻碍这些方法的推广应用。这种情况现在已经改变，现在有许多可以在个人计算机上使用的项目管理软件包。本节将给读者介绍一些能够有效进行项目管理的概念和技术，有了这些概念和技术再配备各种现成、易用的项目管理软件包，使得设计工程师或管理者能够计划和控制任何规模的项目。

1.3.1 一般概念

在制订项目路线图中，首先要知道项目从哪里开始？打算完成什么？以及需要哪些步骤达到最终目标？另外，还需要知道每步的属性，如成本，所需时间和员工需求量等。这些因素确定后，项目经理开始绘制框图，检测各属性之间的相互关系，尝试去分析可能减慢项目进度的情况。通过将项目的实施进度和最初计划相比较，项目经理能很快找出，项目中的哪部分拖延了进度，哪部分超出了预算。

⁹ 投资税收抵扣为投资成本的百分比，是由政府提供给买方公司的税收减免。在除以资产折旧年数之前，税收抵扣额应从初始资本投资额中减去。

¹⁰ 为了简单起见，这里忽略了一些税收，如折旧、回收、备件和培训的资本化等因素。制订价格策略时，市场营销学会考虑所有这些因素。

¹¹ 本节也由 Richard W. Slocum III 撰写。

¹² 首先确认你是对的，然后再付诸行动。David Crockett

¹³ 绝不要告诉别人怎样做事，只告诉他们要做什么，他们的聪明才智将会使你感到惊讶。General G. S. Patton