

中国工程院院士朵英贤作序推荐!

 Focal Press  
Taylor & Francis Group



MECHANICAL DESIGN  
FOR THE **STAGE**

# 舞台机械设计

展示众多舞台设计实例，提供完整的舞台设计流程

用艺术的头脑设计技术，以科学的技术武装艺术

[美] 艾伦·亨德里克森 (Alan Hendrickson) 著  
科林·巴克赫斯特 (Colin Buckhurst) 著  
魏发孔 编译

 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

# 舞台机械设计

[美] 艾伦·亨德里克森 (Alan Hendrickson) 著  
科林·巴克赫尔斯特 (Colin Buckhurst)  
魏发孔 编译



机械工业出版社

本书从基础理论到大量的计算实例,较系统地阐述了演出场所机械设备设计的基本理论和计算方法,包含舞台机械物理学、舞台机械部件、机械设计过程和舞台机械纲要四个部分,理论严谨,实例充分,可读性强。

本书可作为舞台机械设计方面的教材和培训用书,适合相关院校机械专业、舞台技术专业师生阅读,也可供舞台设备行业的工程技术人员,以及剧场中设计、施工、安装及操作舞台设备的技术人员参考使用。

Mechanical Design for the Stage / by Alan Hendrickson and Colin Buckhurst / ISBN: 978-0-240-80631-0

Copyright © 2008 by Taylor & Francis.

Authorized translation from English language edition published by Focal Press, is an imprint of the Taylor & Francis Group; All rights reserved.

本书原版由 Taylor & Francis 出版集团旗下, Focal 出版公司出版,并经其授权翻译出版,版权所有,侵权必究。

China Machine Press is authorized to publish and distribute exclusively the Chinese (Simplified Characters) language edition. This edition is authorized for sale throughout Mainland of China. No part of the publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

本书中文简体翻译版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。未经出版者书面许可,不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

Copies of this book sold without a Taylor & Francis sticker on the cover are unauthorized and illegal.

本书封面贴有 Taylor & Francis 公司防伪标签,无标签者不得销售。

北京市版权局著作权合同登记 图字: 01-2016-7687 号。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

舞台机械设计/(美) 艾伦·亨德里克森 (Alan Hendrickson), (美) 科林·巴克赫斯特 (Colin Buckhurst) 著; 魏发孔编译. —北京: 机械工业出版社, 2018. 8

书名原文: Mechanical Design for the Stage

ISBN 978-7-111-61135-6

I. ①舞… II. ①艾… ②科… ③魏… III. ①舞台机械-机械设计  
IV. ①J813. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 232716 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: 申永刚 王永新 贺怡 责任编辑: 王永新 申永刚

责任校对: 王明欣 封面设计: 鞠 杨

责任印制: 张 博

三河市国英印务有限公司印刷

2019 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·21.25 印张·515 千字

0001—1200 册

标准书号: ISBN 978-7-111-61135-6

定价: 139.00 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](http://www.cmpbook.com)

读者购书热线: 010-68326294 机工官博: [weibo.com/cmp1952](http://weibo.com/cmp1952)

金书网: [www.golden-book.com](http://www.golden-book.com)

封面防伪标均为盗版

教育服务网: [www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)

# 序

科技为文化塑身，文化为民族铸魂。为我国演艺设备技术的发展成果而喝彩，为使其更加科学健康地发展提升助力。

机械技术这个传统而古老的专业，普通人都能看得懂，专业人士却终生看不透的领域，在自动化技术、信息技术、传感技术、网络技术等，现代技术日新月异的当今时代，它似乎显得苍老而固执。其实，机械技术永远是鲜活的，它是其他所有技术的支撑体，就像人的骨骼、肌肉和血管，无论多么高深的思维、先进的理念，或多么伟大的举动，都要通过躯体肌肉的协调运动才得以发挥。上至航天技术，下至海洋工程，大到宇宙探索，小到微观研究，人类开发的形形色色的技术装备都离不开机械技术的支撑。因此，无须担心它会被淘汰，淘汰的是落后的思维方式，而不是这个技术领域本身。创新的思维方式不断地进取而延续着这门技术的发展进步。

力学、微积分学、机构学、机械工艺学等各类学科出现之前的机械技术，是人们在长期的生产生活中改进工具而发明的，大多以机构技巧为主，一般速度比较低，效率不高，而且一项技术产生和改进的过程只能依靠长期积累和反复试验方得成功，犹如在黑暗中摸索前进。因此，技术产生和运行的效率都很低。直到有了科学理论，技术的发明和改进就有了前瞻性的预测手段，科学大大提高了技术开发的速度，也提高了技术运行的效率，照亮了技术发展的道路。

但是，当今中小企业的技术人员比较缺乏用科学的手段去开发技术，被动模仿和盲目试制的现象还时常存在，缺少理论原理性的把握，尤其在演艺装备制造这个新兴的行业，有待于提高的空间甚为广阔。科学理论指导下的技术也不能免除试验验证的程序，但次数大为减少，时间大为缩短，成功率大为提高。所以，尽可能充分地采用科学理论的手段开发技术，减少盲目性，这大概是目前业内都知晓而未必都做到的事情。

科学的机械技术进入演出场所，则更加增添了艺术的色彩，为演出艺术的提升提供助力，显出了更加旺盛的生命力和多姿多彩的动感魅力。科学技术就像高耸的魔塔将表演艺术这颗明珠擎入云端，使其照亮人类的灵魂。如此，需要演艺设备技术的设计者们深谙表演艺术的精髓，用艺术的头脑设计技术，以科学的技术武装艺术。这种演艺装备制造制造业中技术与艺术的融合，最终升华到了“技”便是“艺”、“艺”便是“技”的高度统一，这才是一种至高的境界。

舞台机械行业是从机械行业中发展起来的，逐步形成具有鲜明特性的，与演出艺术紧密相连，与演出艺术融合发展的独立技术体系，历史较短，正在发展进步。该书是以演出场所舞台机械设计为主要内容的专著，可作为专业教材或基础培训、专业人员的参考用书。该书的译者在演艺设备行业内默默耕耘了几十年，成效卓著，其在该书编译过程的辛勤付出值得肯定。

朵英贤  
2016.7.16于北京

(朵英贤，中国工程院院士、中北大学双聘院士，中国著名自动武器设计专家、中国兵器装备集团公司特聘专家，北京理工大学教授、博士生导师。)

# 编译者说明

本书的英文版是几年前段慧文老师推荐给业内同仁的，我在阅读的过程中编译成了中文稿，意在便于业内技术人员参阅，2013年6月就已成稿，由于外商版权的问题搁置至今，最终在机械工业出版社的努力下解决。翻译出版此书的动机是目前业内此类系统的专业书籍还比较少。另外，我国舞台机械技术起步较晚，这些年的高速发展多以德国为主的欧洲技术体系为参照，而本书渗透着美国文化背景下的技术体系，值得关注其差别。美国技术素以开放、多元、个性、探索、少有传统束缚为突出特点，其更加张扬的现实主义表演手法，深刻影响着演艺装备技术的特征趋向，可为我国更加多样化的演出场所装备技术提供别样的借鉴。我国早期的学者对比东西方文化认为：国人以道、儒学说为主的哲学倡导修身养性，通过自身的修炼适应自然规律，达到人与自然的和谐；西方人则倡导通过科学技巧寻找自然规律来改造自然，掌握技术为人类提供方便舒适的条件。然而，若使东西方文化互相融合则会使人人与自然的和谐达到何种程度呢？

本书是舞台机械设计方面少有的专著，从基础理论到大量的计算实例，较系统地阐述了演出场所机械设备设计的基本理论和设计计算方法，理论严谨，实例充分，可读性强，适合院校相关专业师生、舞台设备行业的工程技术人员，以及剧场中设计、施工、安装及操作舞台设备的技术人员参考使用。文中唯一让读者稍感不便的是有部分算例采用英美制单位，对于这个问题，编译者认为，只要采取“以彼之矛，攻彼之盾”的策略，无须变换单位，从中掌握技术方法即可。

不过，本书的原作者和编译者并不能担保使用本书资料时不通过有资质的专家审核其所采用部分的准确性、适应性和实用性等，就能随意地用于一般的或特定的任意工程实际。本书作者和编译者不承担失误或侵权的责任，其责任应该由使用者承担。

编译本书的过程中心怀感念，我要特别感谢我的两位恩师，朵英贤院士和曹占英教授。他们在我成长的道路上几十年如一日，孜孜不倦的教诲和身体力行的榜样使我终身受益。

另外，我要感谢业内资深专家李畅教授、俞健教授、段慧文教授在专业上给予的指导与帮助。感谢业内专家同仁徐奇老师、郑辉老师、王迎东老师、陈威老师、胡清亮老师，以及帮助和支持过我的所有业内同仁。同时，也感谢原甘肃工业大学曾经的各级领导刘秀芝、王胜航、高文元等在工作上的支持。

谨以此书献给业内年轻的科技人员。让我们共同互勉，为演艺装备技术的发展努力地耕耘。

编译者

# 前言

在舞台上使用的机械有多种多样。一台机械装置可以抓起万钧的重物，也可以轻轻地投下一根羽毛。它的实现也许就像使用一套气缸机构来关闭门扇那样简单；或者就像观众厅顶上安装的枝形吊灯，用多台卷扬机分别提升它的各个单元并控制其同步那样复杂。舞台上有着蓄电池驱动的无线控制的小船，液压升降吊车，模仿百年以前的马拉赛车以及跑在轨道上冒着烟雾、火花和蒸汽的机车等。所有用于实现这些舞台效果的机械都只围绕一个共同点，就是专门设计和制造用来实现导演和布景设计师的艺术目标。

本书是有关这类机械的介绍，写作的目的是为设计、施工、安装以及日常操作舞台设备的剧场技术人员提供参考。这些技术人员以及他们的雇主是一个极其多样化的群体。他们在机械设计方面的正规受教育水平跨度很大，从无完整教育到具备机械工程学位的都有。他们对这类设备的操作和使用经验也可能是有限的或者是广泛的，他们可能在教育或社区剧院、大歌剧院工作，或者为百老汇、拉斯维加斯、旅游或主题公园市场等商业性演出场所服务。毫不奇怪，因为可覆盖的主题范围和潜在的观众多样性决定了本书所包含的内容永远也无法满足这方面的所有人，这是一项不可能完成的目标。然而本书提供了良好的基础开端，其主要目的是作为对这个领域感兴趣的剧场技术人员的参考书。

本书可作为 Alys Holden 和 Bronislaw Sammler 的《舞台结构设计》(Structural Design for the Stage) 的配套教材，因为结构和机械设计常常交织在一起。在耶鲁戏剧学院，《舞台结构设计》安排了超过三个学期的毕业生水平的课程，其中两个学期是在三年制的第一年。本书的第 1 部分和第 2 部分，舞台机械物理学和舞台机械部件安排在第二学年的第一学期。学生经过前一年课程的学习已经具备了木材和钢材的结构知识，并且可应用数学手段解决大部分的问题。第三年作为机械设计选修课，包括第 3 和第 4 部分，机械设计过程和舞台机械概要，作为机械设计课程的参考。

另一个与之配套的大量可选材料来自因特网上关于特征、规格以及各种机械部件的推荐应用等。以前，印刷材料作为技术人员收集保存的主要参考资料。但是今天所有的信息更多地通过网络可在世界上任何地方方便迅速地获得，查到它们不是很困难，因为任何搜索引擎都会搜到数百条诸如“轴承座”“减速电动机”之类的信息，选择资料已不再是麻烦的事情，但随之而来的可能是部分发行人员提供的品牌成为您查找信息的关键限制。

机械设计需要如此多的信息，但目前没有一本书能包括全部内容，因此本书应该是唯一的开端。我曾经考虑许久将书名修改为《舞台机械设计介绍》。整本书已经介绍了每一个单独的主要机械部件：滚子链、齿轮减速器、轴承以及电动机等。一本名为《螺栓连接的设计与性能介绍》的书就有 950 页之多，而且仅仅是介绍！

本书一开始，插图就是一个关键，在现有的资料里很难找到靠近这个题目且能重现的小黑白照片，能找到的往往都不能清楚地显示设备的状况。因此，这里采用的是线条图，有些按插图严格地绘制而成，有些是直接 from 现有设备结构绘图中选出的。自始至终想表达设备装

置的原理，但并不提供加工制造图。本书的主导思想是提供进入机械设计的每一个步骤，而这些无尺寸的描述绝不会让你轻易放弃。现在是否比照片表达原理更清晰，将由读者来判断。

另一个问题是单位的混合使用，在美国人们往往习惯于使用传统的单位制（很早就确立的，但现在与英制单位略有不同）。当然，在世界上其他地方使用的是米制单位，许多美国购进的设备部件都是欧洲或亚洲制造的，因此电动机功率的单位为 W，缺损零件需要米制尺寸配件，且质量的单位是 kg，这是需要我们熟悉的问题。在第 1~6 章中的例题和复习题都混合使用了传统单位制和米制单位制。由于本书的基础原理比较简单，故混合使用单位的麻烦还不是太大。在后续章节中的公式还是用两种单位制进行介绍，但例题和复习题将全部用传统单位制。这不是很理想，但由于问题复杂程度和例题的长度不便使用混合单位。这将给习惯使用米制单位的人们使用这本书带来不便。

本书不包括运行设备所需要的控制系统的内容，机械控制系统由于内容足够多，应由专门的书籍介绍。从安全角度考虑，机械控制系统更多地涉及操作者，在机械整体系统设计中具有专门的职责。

本书中有一些警告和声明，应注意遵守。即使舞台自动化系统中的每一个部分都能正常运行，搬用布景本身也会有危险存在。安全问题始终存在于机械的设计、制造、安装和使用以及演出的全过程中。在工作中应有认真的态度和正确的方法。请服务工程师来验证你的工作，或者开发一种不在你的能力范围内的机器都应有认真的态度和正确的方法。在使用潜在不安全的设备时应坚持你的权利，养成说“不”的习惯。因为没有人比你更了解你能做什么或不能做什么。机械设计需要一定的心态和一定的个性，通过学习和实践来获得知识和经验，工作中应善于观察，注重实际，作风严谨，偏于保守，保证安全。

我要感谢在本书的写作过程中提供过帮助的很多人，第一个也是最主要的是 Adirondac 工作室的 Colin Buckhurst，从我多年作为课堂讲义的一大堆笔记和插图中整理出了第 2 部分的第 13~23 章。没有他大量卓有成效的工作，本书至今不会完成。感谢 Hudson 布景工作室的 Chuck Adomanis，当时他还是耶鲁戏剧学院的学生，他的工程设计论题和设计过程引起了我的注意，在本书中所涉及相关的内容直接由他编写。Hudson 布景工作室的主人 Neil Mazzella 和 Corky Boyd 给了我大量的在百老汇音乐剧项目中工作的机会以及提供了在这里发布信息的机会。

我也要感谢 Bob Goddard、Loren Schreiber 和 Fritz Schwentker。他们读了本书的底稿，并为更正和修订提出了许多有益的意见。要不是我的拖延和写作速度太慢，他们的许多想法本来可以更充分地挖掘和实施，毫无疑问将会使最终结果更加丰富。

我要感谢所有耶鲁戏剧学院的那些人们，他们创造了一套程序，期望对技术剧场的艺术构成持续调查。这都是技术设计和生产部门的主席 Ben Sammler 在技术管理和结构设计的范围里倡导的结果，并且他鼓励其他人在自己专业领域发挥专长。近 30 年来，耶鲁戏剧学院技术专业的学生们持续积累了这些材料。他们的问题和意见铸成了材料的深度，我感谢他们的耐心、学识和强烈的求知欲。

Alan Hendrickson  
于康涅狄格州纽黑文

# 目 录

序	
编译者说明	
前言	

## 第 1 篇 舞台机械物理学

第 1 章 基本概念和定义	3	4.9 练习题	34
1.1 基本原理	3	第 5 章 起升力: $F_{起升}$	35
1.2 位移	4	5.1 重力、重量和起升力	35
1.3 平移的定义	4	5.2 起升力	35
1.4 速率和速度	5	5.3 平衡重	36
1.5 加速度	7	5.4 练习题	37
1.6 $x$ 、 $v$ 和 $a$ 之间的图像关系	7	第 6 章 最大功率和力	38
1.7 练习题	9	6.1 功率	38
第 2 章 匀加速运动公式	10	6.2 最大功率	39
2.1 匀加速运动	10	6.3 最大力	42
2.2 匀加速运动的常用公式	11	6.4 练习题	43
2.3 已知时间和距离的运动	14	第 7 章 旋转运动的基本原理	45
2.4 重力加速度	16	7.1 旋转运动的定义	45
2.5 练习题	17	7.2 坐标系	45
第 3 章 加速物体的力: $F_{加速}$	18	7.3 角位移	46
3.1 概述	18	7.4 角速度	48
3.2 牛顿运动定律	18	7.5 角加速度	48
3.3 质量和力	19	7.6 线性关系和旋转关系之间的转换	49
3.4 质量和力的换算	20	7.7 向心加速度	49
3.5 重量	20	7.8 恒角加速度的公式	50
3.6 加速物体需要的力	21	7.9 转矩	51
3.7 练习题	22	7.10 练习题	52
第 4 章 摩擦力: $F_{摩擦}$	23	第 8 章 加速质量的转矩: $T_{加速}$	54
4.1 摩擦——复杂性及简化	23	8.1 概要	54
4.2 定义	24	8.2 转动惯量	54
4.3 滑动摩擦	25	8.3 旋转轴线的变换	57
4.4 静摩擦	26	8.4 $\omega k^2$	59
4.5 动摩擦	27	8.5 加速物体的转矩	59
4.6 摩擦因数的测量	28	8.6 滚动体	64
4.7 滚动摩擦	30	8.7 练习题	65
4.8 绳在柱面上的摩擦	31	第 9 章 克服摩擦的转矩: $T_{摩擦}$	66

9.1 转动和摩擦 .....	66	11.1 功率 .....	84
9.2 由摩擦产生的转矩: $T_{\text{摩擦}}$ .....	67	11.2 最大功率 .....	85
9.3 脚轮摩擦及转台 .....	67	11.3 最大扭矩 .....	92
9.4 回转轴承的摩擦 .....	71	11.4 质量和弹性振动 .....	93
9.5 练习题 .....	75	11.5 练习题 .....	94
<b>第 10 章 起升转矩: <math>T_{\text{起升}}</math> .....</b>	<b>77</b>	<b>第 12 章 多种运动的组合 .....</b>	<b>96</b>
10.1 概要 .....	77	12.1 概要 .....	96
10.2 质量中心 .....	78	12.2 直线运动和旋转运动的功率组合 .....	96
10.3 起升转矩 .....	79	12.3 功率方程的转换条件公式 .....	99
10.4 练习题 .....	82	12.4 多种速度组合的影响 .....	101
<b>第 11 章 最大功率和转矩 .....</b>	<b>84</b>	12.5 练习题 .....	105

## 第 2 篇 舞台机械部件

<b>第 13 章 安全 .....</b>	<b>108</b>	14.18 补充信息 .....	127
13.1 一般概念 .....	108	<b>第 15 章 减速 .....</b>	<b>128</b>
13.2 风险评估 .....	109	15.1 减速 .....	128
13.3 消除危险 .....	109	15.2 减速方法 .....	129
13.4 单件失效预防设计 .....	110	15.3 补充信息 .....	141
13.5 设计系数和安全系数 .....	111	<b>第 16 章 轴 .....</b>	<b>142</b>
13.6 紧急停机 .....	112	16.1 轴的基础知识 .....	142
13.7 相关法规和标准 .....	112	16.2 轴的强度 .....	142
13.8 正式程序 .....	113	16.3 轴直径和扭转刚度的经验规则 .....	143
13.9 检查及维修 .....	114	16.4 轴的其他应力源 .....	144
13.10 补充信息 .....	115	16.5 轴的弯扭组合分析 .....	145
<b>第 14 章 驱动装置 .....</b>	<b>116</b>	16.6 共振速度 .....	146
14.1 电动、液动或气动 .....	116	16.7 应力集中 .....	147
14.2 驱动器 .....	116	16.8 键和键槽 .....	147
14.3 电动机 .....	116	16.9 实际轴设计的考虑 .....	149
14.4 常见的电动机类型 .....	117	16.10 补充信息 .....	153
14.5 规格和配置 .....	118	<b>第 17 章 轴承和轮 .....</b>	<b>154</b>
14.6 制动减速电动机 .....	119	17.1 轴承 .....	154
14.7 速度/转矩曲线 .....	119	17.2 滚动轴承 .....	154
14.8 机壳 .....	120	17.3 滑动轴承 .....	155
14.9 服务系数 .....	120	17.4 压力和速度计算 .....	156
14.10 选择电动机 .....	120	17.5 带座轴承 .....	157
14.11 液压执行机构 .....	121	17.6 直线轴承 .....	158
14.12 气压执行机构 .....	121	17.7 回转支承或转盘轴承 .....	159
14.13 缸 .....	122	17.8 凸轮从动件 .....	160
14.14 缸的安装形式和活塞杆的尺寸 .....	123	17.9 轨道承载能力 .....	161
14.15 止动管 .....	125	17.10 选择轴承应考虑的问题 .....	162
14.16 缸的选择 .....	125	17.11 滚轮及脚轮 .....	163
14.17 平衡阀 .....	127	17.12 滚轮及脚轮的相关术语 .....	163

17.13 专用轮 .....	164	20.4 常见螺旋副的使用 .....	182
17.14 补充信息 .....	164	20.5 补充信息 .....	184
<b>第 18 章 钢丝绳和滑轮 .....</b>	<b>165</b>	<b>第 21 章 制动器 .....</b>	<b>185</b>
18.1 钢丝绳 .....	165	21.1 弹簧装置制动器 .....	185
18.2 钢丝绳的相关术语 .....	165	21.2 制动噪声 .....	187
18.3 检查 .....	168	21.3 制动器的安装位置 .....	187
18.4 滑轮 .....	168	21.4 手动释放 .....	188
18.5 滑轮的相关术语 .....	169	21.5 安装方向 .....	189
18.6 补充信息 .....	171	21.6 流体动力制动回路 .....	189
<b>第 19 章 卷筒 .....</b>	<b>172</b>	21.7 超速制动 .....	190
19.1 有槽卷筒 .....	172	21.8 制动与释放速度 .....	190
19.2 卷筒的类型 .....	172	21.9 补充信息 .....	191
19.3 卷筒部件 .....	173	<b>第 22 章 控制元件 .....</b>	<b>192</b>
19.4 卷筒的材料 .....	174	22.1 外置传感器 .....	192
19.5 绳槽尺寸 .....	175	22.2 位置传感 .....	193
19.6 卷筒的直径 .....	175	22.3 限位开关速比 .....	194
19.7 卷筒的长度 .....	175	22.4 断火 .....	195
19.8 卷筒槽每英寸螺纹线数 .....	176	22.5 插接件 .....	196
19.9 钢丝绳的锚固 .....	177	22.6 补充信息 .....	196
19.10 卷筒的制造 .....	177	<b>第 23 章 框架及结构 .....</b>	<b>197</b>
19.11 卷筒绕绳方式 .....	178	23.1 一般概念 .....	197
19.12 补充信息 .....	179	23.2 全护围的框架与敞开的框架 .....	197
<b>第 20 章 螺旋副 .....</b>	<b>180</b>	23.3 角钢型与数控切割板型 .....	198
20.1 螺旋副的基本原理 .....	180	23.4 钢材与铝材 .....	199
20.2 滑动螺旋副——爱克米螺纹 (英制 T 形螺纹) .....	181	23.5 安装与操作的选择 .....	199
20.3 滚动螺旋副——滚珠丝杠 .....	182	23.6 结构设计要考虑的问题 .....	200

### 第 3 篇 机械设计过程

<b>第 24 章 剧场的机械设计 .....</b>	<b>204</b>	26.2 概念生成技术 .....	229
24.1 概要 .....	204	26.3 概念评估 .....	233
24.2 五个关键点 .....	204	26.4 评估矩阵 .....	234
24.3 产业和剧场的机械设计 .....	207	26.5 自由度与约束度 .....	235
24.4 影响一个人设计能力的因素 .....	209	26.6 自由度 .....	235
24.5 总结 .....	213	26.7 一些不同的约束问题 .....	238
<b>第 25 章 设计说明 .....</b>	<b>215</b>	<b>第 27 章 细化设计 .....</b>	<b>239</b>
25.1 概要 .....	215	27.1 概要 .....	239
25.2 什么时候技术规格书是必要的 .....	216	27.2 分析 .....	239
25.3 一份完整技术说明的要素 .....	217	27.3 失效模式及后果分析, FMEA .....	241
25.4 总结 .....	227	27.4 零部件及材料清单 .....	242
<b>第 26 章 概念设计 .....</b>	<b>228</b>	27.5 绘图 .....	242
26.1 概要 .....	228	<b>第 28 章 制造工艺性设计 .....</b>	<b>244</b>

28.1 概要 .....	244	28.4 外协加工 .....	248
28.2 制造工艺性设计 .....	244	28.5 方便装配的设计 .....	250
28.3 与工艺性设计有关的问题 .....	245	28.6 结论 .....	254

## 第4篇 舞台机械纲要

<b>第29章 舞台机械纲要</b> .....	256	31.3 转台驱动原理 .....	282
29.1 概要 .....	256	31.4 有限转动转台驱动的原理 .....	288
29.2 多数机器常见的细节 .....	257	31.5 机器的细节 .....	291
29.3 手动备份 .....	259	31.6 转台驱动的详述 .....	293
<b>第30章 卷扬机</b> .....	261	<b>第32章 升降台</b> .....	296
30.1 概要 .....	261	32.1 概要 .....	296
30.2 典型应用 .....	261	32.2 一种典型应用 .....	297
30.3 钢丝绳卷筒卷扬机的原理 .....	263	32.3 升降台的原理 .....	302
30.4 链条传动卷扬机的原理 .....	263	32.4 液压缸运行升降台和调平技术 .....	309
30.5 直接驱动卷扬机的原理 .....	264	32.5 升降台技术参数 .....	312
30.6 零偏角卷扬机的原理 .....	268	<b>第33章 随动布景</b> .....	313
30.7 卷扬机的结构细节 .....	271	33.1 概要 .....	313
30.8 卷扬机的规格问题 .....	272	33.2 典型应用 .....	313
<b>第31章 旋转驱动</b> .....	275	33.3 车台轨道驱动的原理 .....	321
31.1 概要 .....	275	33.4 电缆拖链机械爪 .....	324
31.2 典型应用 .....	275	<b>参考书目</b> .....	327

# 第1篇

## 舞台机械物理学

机械设计从广义上讲就是为满足特定目标而开发一种机器的过程。剧场演出机械的设计涉及把导演或布景设计师的设想转变成为真正理想的换景机械。这个过程中，最基本和最初的工作是确定有关舞台布景及其运动的参量。确定参量时有许多问题需要查询和解答。例如，快速运动的最大速度是多少？舞台布景的质量是多少？车台运行 25ft<sup>⊖</sup> 台面板倾斜多少度？转台旋转半圈的误差是多少？升降台升起 2.2m 的运动精度是多少？滚动脚轮在平滑的舞台地板上是有纯滚动还是有滑动？这些问题以及许多其他诸如为一个给定的运动估计所需的功率、力和速度等问题的解答，都是机械设计考虑的条件。

本书第 1 篇包括第 1~12 章，每章都给出了布景给定运动所需的最大功率的计算公式，布景给定运动通过系统定义和描述。这些为达到换景效果而需要的运动有两种情况：一种是直线运动，如车台、升降台、飞行机构等；另一种是旋转运动，主要是转台。定性描述这些概念需要用到两个基本公式。

直线运动状态下搬运布景所需的最大功率为

$$P_{\max} = (F_{\text{加速}} + F_{\text{摩擦}} + F_{\text{起升}}) v_{\max}$$

换句话说，最大功率等于三个力之和乘以最大速度。这三个力是：使布景加速或速度变化所需要的力；驱动布景运动时克服摩擦阻力所需要的力；升起运动部分的垂直分量所需要的力。

这些基本逻辑在日常经验中可以明显地体会到，如汽车的行驶。

1) 一辆装有强劲发动机的空载跑车与装有较弱发动机的重载车辆相比，可获得更大的加速度。

2) 道路平坦且轮胎气压充足的情况下可减小车辆的摩擦阻力。在沙石和泥泞以及低劣的路面上行驶，需要更大的力来克服复杂的摩擦阻力。

3) 从发动机的声音可判断驱车上坡时比下坡时要吃力得多。

毫不奇怪，对于圆盘的转动也有同样的基本关系；

⊖ 1ft = 0.3048m, 1ft = 12in, 1in = 0.0254mm。

$$P_{\max} = (T_{\text{加速}} + T_{\text{摩擦}} + T_{\text{起升}}) \omega_{\max}$$

这里的基本原则是相同的，只是力被转矩所代替，速度被角速度（用希腊小写字母  $\omega$  表示）所代替。同样，上述日常经验中汽车的实例在这里也适合。因为此处的所有驱动功率都是从发动机传动到轮胎，实际上都是转动的，只是轮胎通过接触路面将转矩转换成了力。

上述两组公式在以下章节中并不是都要完整用到。它们实际上是有针对性的公式，只适用于特定状态下，但由于大多数布景运动都是直线运动或旋转运动，故这两组公式经常会用到。

# 第 1 章

## 基础概念和定义

### 1.1 基本原理

基本原理的概念构成了物理学的基础。物理学描述的任何事物都可以用基本原理建立的概念表达。基本原理不能简化到缺少基本概念或定义不确定的程度，因此基本原理是我们设计运动机械的出发点。

对于基本原理的使用有一定主观性选择的成分。科学探索在可能简单的地方出发，而基本原理应该理解为普遍的显而易见的概念。基本原理的数量尽可能少，而作为一个整体，它们仍然是建立在它们基础上的物理学的完整基础。基本原理需要涵盖所有的基础概念，在本书中包括时间、长度、质量或力。在基本原理中，质量和力任选一种，在过去每种都曾被倾向于优先选择。质量和力通过牛顿第二定律联系起来，在以后的章节中将会继续讨论。

时间或许是最无形的概念，然而人人都会感受到它。尽管爱因斯坦说，时间经过的速率和方向是不变的。时间向前移动，唯有它的消失可以度量。时间的单位是基本原理中最普遍的单位。本书始终将 s、min、h 的单位随意地混合使用。这种混用通常有：ft/s、r/min、km/h。

基本长度提供了空间的尺度。物体在空间的位置可以用长度来确定。物体的测量需要一个固定的起点，这是任何事物都会遇到的问题。从一开始就明智地选择起点往往会使问题简化。一个典型的例子是测量一套公寓的宽度时对起点的选择。从一个突出的位置选择起点可能获得完全有效的测量，如城镇的中心。测量员在三维空间用三角法测量公寓的宽度，但这种方法并不会快速、准确或容易地测得。不用三角法测量可以使问题简化，从公寓的两条边各选择一点，并连接两点向前延伸到另一个可以作为起点的位置，使三点成为一条直线。然后分别测量起点到公寓边的两点的距离，并将两次测量值相减的绝对值作为计算结果，其计算公式为

$$\text{公寓的宽度} = |x_1 - x_2|$$

式中， $x_1$  和  $x_2$  是两次测量的长度（ft 或 m）。

尽管我们假定公寓的一个边为起点只是临时的，但当我们从起点到另一边测量两次长度尺寸时总要包括一个零测量值。这样做有两个优点。我们无须从城市中心测量，并且进行两个测量值相减的绝对值运算将变得没有意义，因为总有一个值为零。当然，当使用卷尺测量时，将卷尺的一头放在公寓的一个边进行测量就无须考虑太多，我们常这样做。

长度的起点可能是点，如球形屋顶的中心，也可能是线，如舞台边缘的踢脚线，也可能是面，如舞台面板。在所有三维空间里，位置测量不仅只包括长度，这是因为单纯从起点测

量长度不能表达方向，会产生歧义。这就需要通过指定方向来消除歧义。例如，在一维或直线运动系统中，运动物体的位置需要通过物体距起点的长度和两种状态来表示，即上下、内外、+/-等。因为像位置这样需要大小和方向的量在物理学中是很普遍的，通常用一种专门的数学规则和标记表达。既有大小又有方向的量统称为矢量，因而位置就是矢量。大多数教材中习惯用黑体  $\mathbf{X}$  表示矢量，用  $x$  表示量的大小。在一维系统或直线运动系统的位置矢量，简单地用距起点的距离（通常使用的单位有 m、ft 或 in）和表示方向的符号“+”或“-”来表示。

用于表示位置的符号+或-是随意选择的，一旦确定一种状态，另一种状态随即就被确定。有些选择非常明显，假定舞台面是起点或零点，垂直向上到台塔为正；垂直向下到台仓为负，而相反的假设也是有效的。在某些情况下，可能没有明确的约定。相对于舞台中心右边是正还是负？最终你的选择无关紧要，只要选择并坚持即可。

## 1.2 位移

如果一个物体是运动的，它位置的变化称为位移。为了便于定量地描述，通常将运动分为直线运动和旋转运动。任何运动，如车轮的滚动或抛物的运行轨迹都可以用直线和旋转两种运动的叠加来描述。它的准确性和完整性远比我们移动 99% 的布景所需要的运动要复杂得多。假设第 1~6 章所有的运动都是线性运动，即运动定义为直线运动；其余的章节中将所有运动定义为旋转运动或沿一个固定轴的转动。这些假设是可以接受的，因为吊杆机、车台、升降台等通常只是直线运动；转台一般都是围绕一个相对静止的圆心做旋转运动。因此概括强调一下：



假设：第 1~6 章的全部的运动是直线运动。

## 1.3 平移的定义

如果物体的位置用两个不同的时间记录，即  $t_1$  时刻处在  $x_1$ ， $t_2$  时刻物体处于  $x_2$ ，那么其位移的定义为

$$\Delta x = x_2 - x_1 \quad (1-1)$$

$\Delta$  的含义是某数值的变化量， $\Delta x$  就是“ $x$  的变化量”，即“位置的变化量”。 $\Delta$  意味着两个变量相减的差值，从第二个变量中减去第一个变量的差值，变量的下标代表时间顺序，下标数值小的代表时刻在前，下标数值大的代表时刻在后。因此， $x_1$  的测量位置在  $x_2$  的前面，同样  $x_2$  在  $x_3$  的前面。

如同前面提到的，适当选择起点可以使计算简化，假如  $x_1$  位于起点，那么位移就可以简化为

$$\begin{aligned} \Delta x &= x_2 - x_1 = x_2 - 0 \\ &\text{或 } \Delta x = x_2 \end{aligned}$$

位置和位移是两种长度的基本原理。长度的单位在世界上大多数国家用 m，而在美国用 ft、in 和 mile。虽然本书主要针对美国读者，但米制系统的广泛性不能忽视。我们购买欧洲或亚洲制造的机器，其说明书采用米制单位，因此我们必须熟悉两种测量系统。在以下的举

例中米制单位（即 SI 或国际单位）和美制单位混合使用。本书使用米制单位的举例标题将用符号“(SI)”表示。

**示例：**一台停在舞台中心的车台，先运动到舞台右侧距舞台中心 10ft 的位置，再运动到舞台左侧距舞台中心 2ft 的位置。第一次运动的距离是多少？第二次运动的距离是多少？总共位移是多少？

**解答：**在这个问题中有三个位置，即

$x_1$ 是在  $t_1$ 时刻的位置，初始状态

$x_2$ 是在  $t_2$ 时刻的位置，第一次运动后

$x_3$ 是在  $t_3$ 时刻的位置，第二次运动后

将数值代入变量，为了方便计算，设舞台中心为零点（如果您愿意，也可以将舞台右侧的墙或市中心作为零点）。此问题中我们假设（这个假设是随意的）舞台中心的右侧为正；舞台中心左侧为负，那么

$$x_1 = 0\text{ft} \quad x_2 = +10\text{ft} \quad x_3 = -2\text{ft}$$

将上述数值代入计算式，可以解出答案。第一次运动的位移为

$$\Delta x_{\text{第一次运动}} = x_2 - x_1 = (+10)\text{ft} - 0\text{ft} = +10\text{ft}$$

第二次运动的位移为

$$\Delta x_{\text{第二次运动}} = x_3 - x_2 = (-2)\text{ft} - (+10)\text{ft} = -12\text{ft}$$

从开始到结束的总位移为

$$\Delta x_{\text{总}} = x_3 - x_1 = (-2)\text{ft} - 0\text{ft} = -2\text{ft}$$

注意示例中下标“第一次运动”的描述，这将对厘清关系有很大帮助。

**示例 (SI)：**一道吊杆从距舞台面 3.65m 升高到距舞台面 16.25m，吊杆的位移是多少？

**解答：**这个问题中零位已经确定，因“距舞台面”就隐含了舞台面为零位。还需要假定方向，一般假定舞台面以上为正（虽然不是必需的）。由此两个位置为

$x_1$ 是  $t_1$ 时刻的位置，初始位置 = +3.65m

$x_2$ 是  $t_2$ 时刻的位置，第一次运动后 = +16.25m

因此运动期间的位移为

$$\Delta x_{\text{运动期间}} = x_2 - x_1 = (+16.25)\text{m} - (+3.65)\text{m} = +12.60\text{m}$$

计算结果为正，表示吊杆向上运动。

## 1.4 速率和速度

如果一个物体在一定的时间间隔内经过了一定的位移，很容易计算出其平均速率。

$$\text{平均速率} = \text{单位时间经过的距离} = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

距离和时间的单位决定了速率的单位，常用的单位有 mile/h、m/s、ft/s 等。速率没有方向，但任何运动都具有速率和方向。用一个包含速率和方向的矢量来定义速度，其数学表

达式为

$$\bar{v} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} \quad (1-2)$$

式中  $\bar{v}$ ——平均速度 (ft/s 或 m/s)；

$x$ ——位置 (ft 或 m)；

$t$ ——时间 (s)。

$\bar{v}$  上面的横线表示平均数学符号，平均值可通过两数相加再除以 2 得到

$$\bar{v} = \frac{v_1 + v_2}{2}$$

如果  $t_1$  时刻所在的位置  $x_1$  同  $t_2$  时刻所在的位置  $x_2$  相同，那么式 (1-2) 的结果将是零。由于在有限的时间间隔  $\Delta t$  内，物体在  $t_1$  和  $t_2$  之间任意点的位置是未知的，物体可能在  $\Delta t$  期间持续地来回摆动，因而在测量时恰好在同一位置。式 (1-2) 仅用于计算平均速度。

如果时间间隔  $\Delta t$  变得很小，那么运动的物体在  $\Delta t$  期间可以认为是瞬间静止的，而将得到瞬间速度  $v$ 。时间间隔  $\Delta t$  不能为零，因为零不能作为除数。然而，在数学公式中  $\Delta t$  的值可以变得极其微小。本书中大部分计算无须进行微分，因为本书分析的运动都比较简单，我们需要的是快速得到功率或力的合理估算值。下面给出了完整的瞬时速度和加速度的公式，便于理解这些公式的人查阅基础概念，这部分可以跳过而不影响阅读下文。

当时间间隔变得无限小，在那一刻获得的速度是真实的，称为瞬时速度，数学表达为

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{dx}{dt}$$

如果物体运动的速率和方向不变，那么平均速度和瞬时速度相等：

$$\bar{v} = v = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{dx}{dt} \quad \text{只有速度是常数时，此式才成立}$$

速度是单位时间的位移，因此其单位有 ft/s、ft/min、m/s。在室外常用单位有 mile/h、km/h 等。

**示例：**一只苍蝇飞过 40ft 的距离用了 8s，问它的平均速度是多少？

**解答：**首先假定“向内”的方向为正（这是完全随意的选择，“向外”也可以为正）。为变量赋值：

$$\Delta x_{\text{总}} = +40\text{ft} \quad \Delta t_{\text{总}} = 8\text{s}$$

计算平均速度：

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{40}{8} \text{ft/s} = 5\text{ft/s}$$

由于矢量的方向用数值前面的符号表示，平均速度为正意味着距离和速度方向一致。在这种情况下，这是一个直观而明显的结果。

**示例 (SI)：**卷扬机可达到的最高速度是 1.2m/s。以最高速度提升布景 5.5s，布景移动的距离是多少？

**解答：**如果卷扬机在 5.5s 的时间内以匀速运行，在此时间内的平均速度等于瞬时速度。