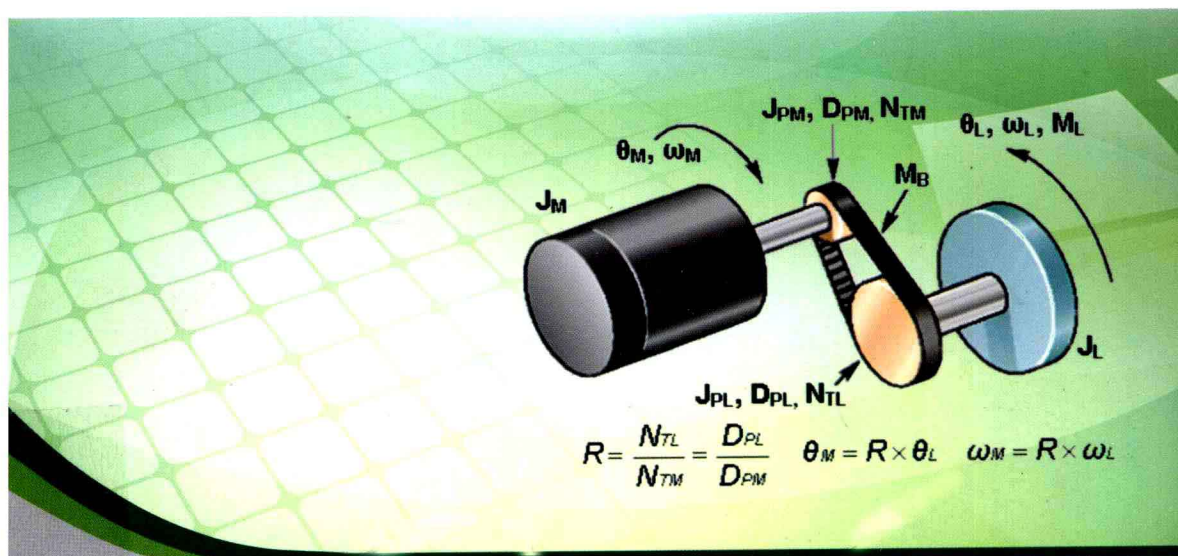


机器设计中伺服电机 及驱动器的选型

(美) MENG KING
李幼涵 编著



QI SHE JI ZHONG SUO DIAN JI JI LOU DONG GOU DE XUAN XING



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



机器设计中伺服 电机及驱动器的选型

(美) MENG KING 编著
李幼涵



机械工业出版社

在当前的机器设计中,我们面临着提高效率,节能降耗,可靠稳定和降低成本挑战。如何正确地选择驱动器和伺服电机成为设计机器是否能够达到工艺要求,同时满足最佳能量匹配的重要因素。本书从机械、运动理论入手,分析了组成机器的各种常用部件的传动特性,力和力矩,惯量计算方法。阐述了满足机器性能后的电机稳定工作规则及最佳配置规则,并以案例方式示教了采用手工计算选型和软件选型的方法。

本书对机器及机械结构设计的工程师有很好的参考作用,对从事运动控制产品应用和销售的工程师也有很好的指导作用,也可作为机电一体化专业大学生或研究生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

机器设计中伺服电机及驱动器的选型/(美)金蒙恩,李幼涵编著.
—北京:机械工业出版社,2012.3
ISBN 978-7-111-37692-7

I. ①机… II. ①金…②李… III. ①机械设计②伺服电机③驱动机构 IV. ①TH122②TM383.4③TH132

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第043114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:林春泉 责任编辑:林春泉 吕潇

版式设计:石冉 责任校对:刘志文

封面设计:路恩中 责任印制:杨曦

保定市中国画美凯印刷有限公司印刷

2012年5月第1版第1次印刷

169mm×239mm·9印张·170千字

0001—4000册

标准书号:ISBN 978-7-111-37692-7

ISBN 978-7-89433-362-9(光盘)

定价:66.00元(含1CD)

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

社服务中心:(010) 88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010) 68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010) 88379649

读者购书热线:(010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

序

在近代工业自动化的发展史上，越来越偏重软件的开发。一方面，针对工业机器应用上的电机控制算法不断地提高和更新；另一方面，软件的开发使控制器（PC 和 PLC）的功能不断强大。越来越多的通信功能无缝地集成到软件中，其目的是提高生产力和响应倡导的节能增效。施耐德电气公司已经把重点放在了为用户提供最佳的工厂和机器自动化解决方案以及能源管理解决方案上。由于我们一贯努力将我们的解决方案尽可能简单地呈献给用户，所以我们能一直成功地在工业自动控制领域保持领先地位，并且得到越来越多的、有经验的专业人士的合作。无论你对运动控制器和驱动器，例如施耐德 Lexium 系列伺服驱动产品有多么了解，但将它们实际应用在机器上时，你还必须了解机械的参数和性能，以便正确地选择驱动器和电机，这个环节在当今的教学中往往被忽略。因此，我们非常需要一本有关机电一体化知识和经验的参考书。

自从发明了电机，机械部件的惯量和转矩的计算仍没有发生改变。所有电机的运行仍然要满足机器对速度，转矩和惯量的要求。然而，有关深度探讨电机选型过程，不停留在各种电机杂志表面文章的参考书确实很少。

本书主要介绍了组成机器的机械部件进行电机的选型。通过对电机的选型过程给读者一个清晰的概念，那就是机器要想达到最大的生产力应满足什么样的条件。

当然，尽管所有的计算部分可以通过施耐德电气公司配套开发的选型软件很容易地完成，但你必须先要了解基本的机械学知识。

掌握这些知识是我们的员工和用户成功地实现自动化解决方案的关键。作为施耐德电气公司的代表，我自豪地向你们推荐这本书，希望你们能够享受阅读这本书带来的快乐。

Alain Dedieu
Senior VP Motion & Drives
Schneider electric



Preface

In the recent history of industrial automation a lot of emphasis has been put on the software part of it . Either to develop new advanced algorithms for controlling the motors in the industrial machine applications , or to make the controllers (PC or PLC) more powerful , more communicating and seamlessly integrated in software suites which aim is to improve productivity and recently for energy efficiency purpose. Schneider Electric has been focused on offering the best solution to our customer’s for both factory automation and energy management . Our goal has always been to make the development of solutions as simple as possible for our customers and we have been successful doing it as we were getting more and more skilled automation people in the industry.

However and regardless all the advanced controlled products like Lexium series motion controllers we know by experience that it is mandatory for any one who’s involved in the machine automation field to understand the mechanical parameters and behaviors in order to size correctly the electronic devices. This is less and less highlighted by the education world but it remains a must to be equipped with the knowledge of electro – mechanic , hence the need for a good knowledge reference book.

The calculation of inertia and torque of mechanical components has not changed since the invention of the electric motor. All the motor has to do is to match the speed , inertia and torque requirements from the machine. However, a written book on in – depth motor sizing process, not those superficial articles on various motion magazines, is extremely rare.

This book features primarily on servo motor sizing for the mechanical components that constitute the machine. Through the motor sizing process the reader is able to develop a keen sense of what the machine really needs for it to achieve the maximum productivity.

Of course all the calculation part is made easy by the development in parallel of “sizer” software . However the basic understanding of mechanics remains a must.

The possession of such knowledge for our employees and our customers is a key to the success of the automation solution endeavor.

On behalf of Schneider electric I'm proudly presenting this book to all of you and I wish you a pleasant and enriching reading.

Alain Dedieu
Senior VP Motion & Drives
Schneider electric

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Alain Dedieu', written over a horizontal line.

前 言

与前不久出版的第一本书《运动控制技术与应用》相比，本书主要论述了电机的选型。主要内容包括如何正确地选择驱动器和电机，使设计机器能够达到工艺要求，同时满足最佳的能量匹配。从机械，运动理论入手，分析了组成机器各种常用部件的传动特性，力及力矩，惯量计算方法。阐述了满足机器性能使电机稳定工作的规则，最佳配置规则。还包括了大量的基本公式、方程，并将这些基本公式列成了表格，读者需要时无须再在其他资料中查找，方便、省时。当读者耐心读完并领会本书的核心概念后，在解决实际选型问题时一定能派得上用场。

读者也许会问，在当今有大量计算工具的条件下，为什么还要费事地采用手算？原因有两个：第一，通过手算，读者可以清晰地了解对一个机器设计而言，哪些参数是重要的，必须特别关注的。例如：机器要完成什么工艺，它们各个阶段的运动曲线对机械运动部件的要求和能量分配；第二，读者采用的选型工具覆盖的机械部件不够，可能有误差，而这些误差即使你特别仔细有时也无法发现。所以，在整个计算过程中，采用手算可以避免这些误差对机器的造成的任何损坏。

在这本书中，通过很多实际的案例，循序渐进地讲解重要的概念和注意事项以及我们的建议，同时澄清了一些误解。这些例子已经由选型软件进一步验证。得到的结果与手算的结果吻合。读者可以在采用选型软件计算之前，试着按照书中的示教采用手算方法练习一下。

对于销售人员，通过阅读本书，当你熟练地掌握了选型软件，你就可以自信地告诉用户，对于一台机器，某台电机选择的好与不好，权衡它们的应用是可行还是不可行。当用户对你的结论表示怀疑时，你可以运行选型软件给他们看一下你的计算和结论。这将增加客户对你专业知识的信任，使你赢得更多的业务，达到你的销售目标。

本书同时涵盖了 Lexium 选型软件和施耐德电气公司选型软件的应用。读者可以联系各地办事处或从互联网上下载安装这些选型工具。

本书的内容专为配合施耐德电气公司的 Lexium Sizer 和 Schneider Sizer 软件编写，为了保持与实际软件和设备的一致，以方便对照，增强实际应用性，本

书中有一部分内容使用了非法定计量，请读者在阅读和学习时请加以区分。此外，本书中电机均指电动机，不当之处敬请谅解。

希望读者喜欢这本书，并提出宝贵意见，以便我们改进。

最后，我们还要感谢对本书写作给予支持的领导及同事们，你们的鼓励是我们前进的动力。

施耐德电气（中国）有限公司
MENG KING（美） 技术项目经理
李幼涵 全球技术专家
2012年3月于北京

目 录

序

Preface

前言

第 1 章 概述	1
1.1 运动中的选型——为什么?	1
1.2 驱动的变比	1
1.3 惯量	2
1.4 驱动转矩	2
1.5 稳定性	2
1.6 驱动的分辨率及刚性	3
1.7 占空比	3
1.8 伺服选型的程序	3
第 2 章 基本运动的选型概念	4
2.1 直线运动	4
2.2 旋转(角度)运动	5
2.3 旋转与直线运动的关系	6
2.4 直线力, 能量与功率	9
2.5 旋转力, 能量与功率	9
2.6 摩擦力与阻力	11
2.6.1 黏滞摩擦力	12
2.6.2 静摩擦力	12
2.6.3 反作用力	13
2.6.4 摩擦系数	13
第 3 章 计算惯量和力矩	15
3.1 惯量定义	15
3.2 基本惯量计算公式	16
3.3 圆柱体	17
3.3.1 实心矩形块	17
3.3.2 实心圆柱体	19

3.3.3	中空圆柱体(厚壁)	21
3.3.4	中空圆柱体(薄壁)	22
3.3.5	杠杆(摇杆)臂	23
3.3.6	普通传送辊	24
3.4	机械部件和它们的转矩与惯量	25
3.4.1	机械部件的分类及单位的转换	25
3.4.2	常用机械部件	27
3.4.3	联轴器	28
3.4.4	轮盘	29
3.4.5	转台	30
3.4.6	收放卷机器——辊筒	32
3.4.7	带式传动机构	38
3.4.8	带式传送机构	40
3.4.9	齿条和齿轮	43
3.4.10	丝杠	45
3.4.11	直线执行器	47
3.4.12	齿轮传动	49
3.4.13	变速箱(减速机)	51
3.5	平均速度与均方根转矩	52
3.6	最优传动比率	53
3.6.1	什么是最优传动比率	54
3.6.2	惯量小结	56
第4章 运动曲线——速度和力矩		57
4.1	运动曲线概述	57
4.2	典型运动曲线	58
4.2.1	三角形运动曲线	58
4.2.2	梯形运动曲线	59
4.2.3	三角形运动曲线与梯形运动曲线的比较	60
4.3	梯形曲线与三角形曲线的分析	61
4.3.1	最大速度与平均速度	62
4.3.2	加速度与加速时间	63
4.3.3	均方根转矩分析	65
4.4	速度曲线小结	66
4.5	S运动曲线	69
4.6	相关规则	80

第 5 章 选型案例	81
5.1 案例 1——工作转台	82
5.1.1 没有减速机的传动结构	83
5.1.2 有减速机的传动结构	87
5.2 案例 2——丝杠	92
5.2.1 丝杠数据	92
5.2.2 速度曲线	93
5.2.3 如何达到 131r/min 的转速	94
5.2.4 选择电机	95
5.3 案例 3——传送带, 齿轮箱以及带式传动轮	103
5.3.1 计算惯量、转矩和速度	104
5.3.2 能量需求	108
5.3.3 Schneider Sizer 运行结果	110
第 6 章 相关题目综述	111
6.1 通过其他的方法选型	111
6.1.1 负载与电机惯量匹配	111
6.1.2 负载与电机功效匹配	112
6.2 惯量匹配的重要性	112
6.2.1 什么是正确的惯量匹配	112
6.2.2 正确的惯量匹配	113
6.3 功效	114
6.3.1 如何推导功效方程	114
6.3.2 另外一种表示功效的方法	115
6.3.3 按照功效的选型	116
6.4 能量提供	117
6.5 供电选择的方法	119
6.6 再生能量	123
6.6.1 什么时候发生再生能量	124
6.6.2 通用驱动器制动(再生)电阻的选择	125
6.6.3 施耐德驱动器制动(再生)电阻的选择	126
6.6.4 通用驱动器制动(再生)电阻选择的案例	127
6.6.5 施耐德驱动器制动(再生)电阻选择的案例	128
6.6.6 未知驱动器的能量吸收能力	130
6.6.7 更详细地分析再生能量	132
6.7 机械共振	134

第 1 章 概 述

1.1 运动中的选型——为什么？

“能效”在当前是一个非常流行的词语，我们世界中的各项工作都在时刻准备着“节能增效”。施耐德电气公司在这一方面是一个领军者，为了显示我们的决心，我们为员工设置了这样的课程。

如今，许多的电机其实是大马拉小车，超强的运动转矩常常大于机械的实际要求。一般来说，人们更偏好选择大尺寸，大尺寸往往也意味着大功率，我们希望本书中的阐述有助于化解这种思维定势。

作为驱动装置，有一些理由让我们选择大尺寸的电机，如：

- 1) 机器的要求是不确定的。
- 2) 对于销售而言——电机越大，赚得的钱就越多。
- 3) 可用性——大尺寸的电机可以使用很多年。

虽然过大的电机是不可取的。但是，如果功率不够，那么它所产生的问题也会更多。小型的电机是没有办法正确驱动或者移动负载的。甚至，最后可能会面临电机烧毁的麻烦。

根据美国能源部估计，在美国大约有 80% 的电机尺寸都过大。

怎样让伺服驱动和电机与工业机器的性能相匹配，成为一个非常重要的问题。在工业应用中，选择伺服意味着在应用中选择合适的驱动器和电机。其选择的标准是基于提供足够的推力和稳定的伺服驱动器。选择一个伺服驱动的方法可以是由选型软件建立的选型方案组成。在典型的情况下，一台机器的设计者要选择—个驱动器，使得一台机器能够在其最大的生产力下运行，以下的内容都是为了实现这一目标而要加以考虑的。

1.2 驱动的变比

滑台机（就像滚珠丝杠或螺旋导杆）的导程和传动比必须选择与电机额定转速下的机器轴最大进给率相匹配。在变比的选择上，机器的滑动推力是和传动比有关的。电机的转速必须下降至机器的转速。此外，折合到电机的负载惯量是按传动比的平方减少的。

1.6 驱动的分辨率及刚性

对于机床而言，我们还有加工轮廓的要求，但是伺服驱动器有时提供不了很小的加工精度，因此时常需要改变电机的传动比。电气传动的驱动分辨率是与电机传动比成反比的，也就是说电机配的减速机减速比越大（传动比越小），驱动的分辨率越高。同时驱动分辨率与滚珠丝杠的导程成正比。减速比值越大，导程越细（导程个数越多），驱动的分辨率就越好。在对驱动进行选型时，使用减速机将大大提高加工精度。同样，更细的滚珠丝杠导程（in/r 或 mm/r），也可以提高加工精度。此外，由驱动力引起的机器滑动台位移导致的驱动刚性变化是按传动比的平方增加的，刚性的变化也与滚珠丝杠的导程有关。因此，在对伺服驱动进行选型时，要重视考虑运用传动比和较细导程带来的优势（in/r 或 mm/r）。

1.7 占空比

在伺服驱动器的选型中，还要考虑因素有提供多大的推力、机器寿命有多长以及能提供多长的间歇时间。这些参数可以作为驱动器选型的一部分。机器的设计者还需要知道驱动器可以承受多大的过载以及过载的时间会有多长，大多数的机器供应商可以提供这些信息，这些信息应该作为考虑驱动器选型的一部分。

1.8 伺服选型的程序

在工业中，驱动器的选型方案有很多。我们使用的选型软件是 Lexium 选型软件和施耐德选型软件，这两个软件在施耐德电气公司的用户中经常被用到。

这个特别的计算程序，为工程师们组态出好的机械结构及运动工艺提供了多种选择。连接在电机轴上的机械部件可以是线性运动的，如滚珠丝杠；也可以是旋转运动的，如传送带。无论是静摩擦力还是粘滞力都可以进行输入。

合适的伺服电机会被列成清单显示出来，并可以打印出来。

主要的负载惯量将来自最接近电机轴的组件。当使用带式传动的时候，转动惯量是随着它们直径的增加而成4倍加大的。因此，如果使用大直径的辊轮，折合到电机的惯性可能会过大。折中的办法就是用两个滚轮串联起来把变比分开成两个变比。

对于电机直接连接到滑台机（滚珠螺杆）的情况，增加机器的滑动推力和减少折合到电机的负载惯量在比例不变的情况下是不能实现的。此外，驱动器的分辨率和刚性会降低。

1.3 惯量

在选择伺服驱动器时，折合到电机轴上的负载惯量是一个重要的考虑因素，因为折合到电机上的负载惯量在实际中对机器的影响是减小了电机的调节带宽。电机负载的额外增加会改变伺服驱动的补偿，并使驱动的带宽下降。折合到电机上的总负载惯量是负载重量、机器的滑动台、滚珠丝杠、电机联轴器、驱动辊或齿轮箱的惯量总和。并且还有一些对于伺服驱动来说可以忽略的惯量。

1.4 驱动转矩

在选择伺服驱动器的时候，有一个最重要的考虑因素就是确保有足够的对滑动台的推力来满足其运动要求。还有两个必须满足的要求，第一伺服驱动器必须提供足够的机械推力和电机加速的加速转矩。加速转矩是由伺服驱动器的位置环所控制的。加速转矩是折合到电机总惯量和设定加速度的乘积。为了保持对于加速转矩的实际限制，机器滑动台的加速度不应该高于 $1.5g$ ($g = 32.2 \text{ ft/s}^2$ 即 9.8m/s^2)。

1.5 稳定性

伺服驱动器的第二个必须满足的要求，是在所有的工作条件下它必须都是稳定的。虽然，在电机的选型要求中没有“稳定”这一项，但是有一些参数会直接关系到伺服电机的稳定性（例如负载惯量的变化和驱动器中机械和电气时间常数），选型过程可以标示出非常规环境下的应用，我们从事运动控制的工程师要加以综合考虑。

第 2 章 基本运动的选型概念

运动学在描述运动时通常不会考虑引起运动的力，因此我们在接下来的章节中将会讨论一些关于力和其他方面的必要原理，为选型做相关准备。

2.1 直线运动

有关直线运动的物理量（参数）信息见表 2-1。

表 2-1 参数信息

参 数	描 述	英 制 单 位	公 制 单 位	备 注
d	距离	in, ft	mm, cm, m	1 ft = 0.3048m 1 in = 0.0254m
v_m	最终速率	in/s, ft/s	mm/s, cm/s, m/s	
v_o	最初速率	in/s, ft/s	mm/s, cm/s, m/s	
a	加速度	in/s ² , ft/s ²	mm/s ² , m/s ²	
t	时间	s	s	

表 2-2 展示了距离，速度，加速度和时间之间的关系。当给出已知量和未知变量后我们就能决定用哪个公式了。有些时候我们甚至不用再参照表 2-1，也能处理选型相关的问题了。

表 2-2 运动学公式

未 知 量	已 知 量	公 式
D	v_o, t, a	$d = v_o t + at^2/2$
d	v_m, v_o, t	$d = (v_m + v_o) t/2$
d	v_m, v_o, a	$d = (v_m^2 - v_o^2) / (2a)$
d	v_m, t, a	$d = (v_m t) - (at^2)/2$
v_m	v_o, t, a	$v_m = v_o + at$
v_m	d, v_o, t	$v_m = (2d/t) - v_o$
v_m	d, v_o, a	$v_m = (v_o^2 + 2ad)^{1/2}$
v_m	d, t, a	$v_m = d/t + at/2$
v_o	v_m, t, a	$v_o = v_m - at$
v_o	d, v_m, t	$v_o = 2d/t - v_m$

(续)

未知量	已知量	公式
v_o	d, v_m, a	$v_o = (v_m^2 - 2ad)^{1/2}$
v_o	d, t, a	$v_o = d/t - at/2$
t	v_m, v_o, a	$t = (v_m - v_o)/a$
t	d, v_m, v_o	$t = (2d)/(v_m - v_o)$
a	d, v_m, v_o	$a = (v_m^2 - v_o^2)/(2d)$
a	v_m, v_o, t	$a = (v_m - v_o)/t$
a	d, v_o, t	$a = 2(d/t^2 - v_o/t)$
a	d, v_m, t	$a = 2(v_m/t - d/t^2)$

2.2 旋转（角度）运动

表 2-3 列出了旋转运动的相关参数信息。

表 2-3 参数信息

参数	描述	英制单位	公制单位	备注
θ	旋转角	r (圈)	rad (弧度)	1n = 2 π (rad)
ω_m	最终速率	r/s	rad/s	
ω_o	最初速率	r/s	rad/s	
α	加速度	r/s ²	rad/s ²	
t	时间	s	s	

(注意：弧度是没有单位的)。

表 2-4 列出了相关参数的公式。

表 2-4 旋转运动公式

未知	已知	公式
θ	ω_o, t, α	$\theta = \omega_o t + \alpha t^2/2$
θ	ω_m, ω_o, t	$\theta = (\omega_m + \omega_o) t/2$
θ	$\omega_m, \omega_o, \alpha$	$\theta = (\omega_m^2 - \omega_o^2)/(2\alpha)$
θ	ω_m, t, α	$\theta = (\omega_m t) - (\alpha t^2)/2$
ω_m	ω_o, t, α	$\omega_m = \omega_o + \alpha t$
ω_m	θ, ω_o, t	$\omega_m = (2\theta/t) - \omega_o$
ω_m	θ, ω_o, α	$\omega_m = (\omega_o^2 + 2\alpha\theta)^{1/2}$
ω_m	θ, t, α	$\omega_m = d/t + \alpha t/2$

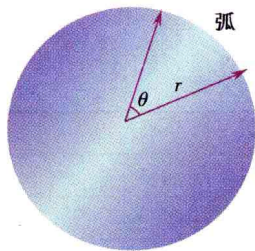
(续)

未知	已知	公式
ω_o	ω_m, t, α	$\omega_o = \omega_m - \alpha t$
ω_o	θ, ω_m, t	$\omega_o = 2\theta/t - \omega_m$
ω_o	θ, ω_m, α	$\omega_o = (\omega_m^2 - 2\alpha\theta)^{1/2}$
ω_o	θ, t, α	$\omega_o = \theta/t - \alpha t/2$
t	$\omega_m, \omega_o, \alpha$	$t = (\omega_m - \omega_o) / \alpha$
t	$\theta, \omega_m, \omega_o$	$t = (2\theta) / (\omega_m - \omega_o)$
α	d, ω_m, ω_o	$\alpha = (\omega_m^2 - \omega_o^2) / (2\theta)$
α	ω_m, ω_o, t	$\alpha = (\omega_m - \omega_o) / t$
α	θ, ω_o, t	$\alpha = 2(\theta/t^2 - \omega_o/t)$
α	θ, ω_m, t	$\alpha = 2(\omega_m/t - \theta/t^2)$

在这里，我们不仅提供一些简单的公式，像直线运动的 $d = vt$ 和旋转运动的 $\theta = \omega t$ 等公式也都列在这里了，当遇到复杂的机械运动时就能很快地找到相应的公式。

2.3 旋转与直线运动的关系

表 2-2 和表 2-4 给出了经典的线性和旋转的运动学方程，现在你需要知道线性运动中所涉及的角度，因为我们需要知道怎样把旋转运动转化为线性运动，反之亦然。对于这些内容，我们需要回到有关于轴旋转运动的基本概念。在此之前，我们先回顾一下弧长，如图 2-1 所示。



- r —— 圆弧的半径
- d —— 圆弧的直径
- θ —— 圆弧角度 (角位移)
- 设 s = 弧长
- 则 $s = r\theta$
- 周长 = $C = 2\pi r = \pi d$

图 2-1 弧长的计算

在旋转运动中有三个测量值：角位移、弧度 (rad)、和公转 (r)。它们之间可以互相转换，下面是它们之间的关系公式：

$$1 r (\text{公转}) = 2\pi (\text{弧度}) = 360^\circ (\text{角位移})$$

$$1 \text{ rad} = 360^\circ / 2\pi = 57.3^\circ$$