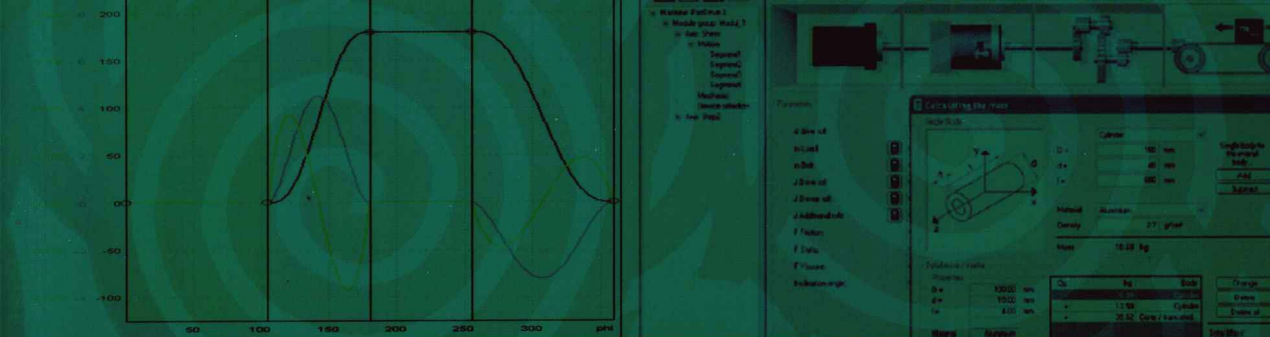




运动控制技术 与应用

(美) MENG KING
李幼涵

编著

YUNDONG KONGZHI JISHU YU YINGYONG



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

运动控制技术与应用

(美) MENG KING 编著
李幼涵



机械工业出版社

序

说起设计机器，最基本的一个目标就是把能量传递到多个可控的机械运动环节，以便提高过去由人力操作所不能达到的效率。所以任何机器制造商关心的是制造的机器生产出来的产品多、速度快并且消耗很少的能源。

一个世纪以来，工程师们为此一直在不懈地努力，从而使设计的机器速度和效率不断提高。从人力驱动的机器到电力驱动的机器，他们关注的是同一件事：那就是如何将力传导到各个生产中的机械运动部件。

实际上，自从电机应用到工业机器上以来，人们早已开始了各种尝试。从最早期的仅仅转动滚筒到目前的电机全范围调速控制，电机发生的各种技术革命已经为机器设计的跳跃式发展开辟了一片绿色田园。

虽然，我们知道电机是降低机械复杂程度和机器成本的核心部件，但显而易见，每一个机器制造商总还是先关注机械传动。因此，我们必须要知道面临的挑战，以及已经熟悉的物理学和运动学带来的不同限制。

这些知识，在当今的 IT 世界已不再以简单的、广泛的方式传播。很多大学及学院已经把重点转向计算机系统。然而，机械结构的设计要点仍然是把旋转运动转化为线性运动或其他形式的运动。这个机械结构也确实不是由物理学和数学概念堆砌起来的综合体。机械设计工作仍然要求有更多的实践经验，而不是简单地像“需要知道”这样地介绍从齿轮箱到更复杂的曲柄。

作为机器设计的第二次革命，电气设备的选择已变得非常重要。电机技术与机械技术已经和谐地联为一体，形成了机电一体化设计思



路。在过去 10 年间电气技术的巨大发展使得自动化突破了电机和机械运动的局限，使机电一体化的设计达到空前的高度。因此，电机选型已成为越来越重要的自动化设计需求。就像未来关注能效一样，机器设计要求电机更加节能。

亲爱的读者，本书在某种意义上已经把长期的经验和理论阐述结合在一起，完整地阐述了运动控制设计的方方面面。对于机器设计工程师必须掌握的知识和概念，重新拾起和浓缩完整的知识历来都是一个挑战。本书将从机械、电气和自动控制概念出发带给你一个能力的提升，应对面临的挑战。享受阅读并把它放在你的机器设计书架上经常翻阅吧。

这些机械运动，电机控制的基础以及工程技术间的交流也是我们的员工和客户经常交谈的，这样才能创新出更好的机器控制解决方案。

Alain Dedieu

**施耐德电气 运动与传动事业部
全球高级副总裁**

Edito

By design a machine basic purpose is to transform energy into multiple controlled mechanical movements in order to improve what human being can do. The concern of every machine builder is therefore to build machines that are producing more, faster, while consuming less energy.

Engineers have been working for centuries on the way to improve the speed and the efficiency of their machine. From humanly actuated machines to electrically actuated machines, their concerns have always been the same: How to transform a force into more productive mechanical movement.

Actually everything really started when the electrical motor took place in the industrial machines. From the earlier stages when motors were just turning shafts up to fully variable speed controlled motors like available today, every change in motor technology has open a new green field for leap frog evolution in machine design.

Although the motor could be seen as a key element for reducing the mechanical complexity and cost embark in the machines, it is also obvious that the concern of every machine builder starts always with the mechanical transmission. Therefore it is very important to understand the challenges, the physics and also the limits of the different kinematics that could exist.

This knowledge, in our IT world is no longer transmitted in a simple and comprehensive manner. Most of the academics have turned their focus to computer systems.

Anyhow the mechanical design which remains the starting point of every machine-transforming a rotary movement into a linear one or a movement of any other kind-is not extremely complex from a physics or mathematics concept stand point. The mechanical design job requires a lot more practical experience that is usually not simply documented as “need to know” from gear



boxes to the most complex cranks.

As a second mandatory step of the machine design stands the Electrical device choice. And the motor technology is nicely bridging the world of mechanical engineers with the Automation engineer one. The electronic technology did make so huge progress during the last decades that automation can push the performance limits of the motors and of the mechanical gears way beyond initial expectations. So that nowadays the motor sizing becomes more and more an automation issue in particular when the design embrace features like optimum sizing for energy efficiency.

Dear reader, this book has been developed to combine in a simple manner year long experiences and theoretical explanations across the complete motion design value proposition. This was a challenge to rebuild and condense a complete knowledge of what every one who wants to design machines has to master. It will offer you a comprehensive approach of the key challenges through all specialties involved from mechanics, electrical and automation stand point.

Enjoy the reading and keep this book as a recurrent reference for your machine design. These mechanical aspects, the basis of advance motor control and the interactions between these engineering sciences are essential for our employees and customers so that together we can create more productive machine.

Alain Dedieu
SVP Motion & Drives

前 言

本书的目的在于给那些不太熟悉运动控制，特别是不太熟悉机电一体化设计领域的应用工程师和销售工程师一个指导。也许你觉得本书涵盖的材料过于简单，也许你在学校已经饱读了相关内容，但是本书介绍的很多机器设备，它的设计都是基于基本的、纯物理定律和那些尽量避免繁杂的数学计算。我们试图给出在一个性能优越的机器设计背后蕴含的每一个定律和实实在在对你有所帮助的，“而不是挑战物理定律”的机器设计基本概念。在本书中，我们详细讨论了运动控制组成的方方面面，包括机械结构的综合考虑和计算，电气设计、在调试过程中驱动器的问题、伺服电机的特性及计算。针对设计和销售人员，本书给出了在运动控制设计中出现的概念和要考虑到的一些参数及其来龙去脉。

本书也可以作为销售人员与客户在讨论运动控制理论时的一个工具。用来判别在机器设计中选择的部件是否正确。

我们力求本书的编写能使你轻松地掌握有关运动控制的核心知识和应用设计的实用概念。应作者要求，本书电机均不改为电动机，请读者注意。在本书的编写和教学过程中，得到了来自德国同事 Juergen Mast 先生的大力支持，他审核了部分章节并提出了很好建议，同时也得到了全球高级副总裁 Alain Dedieu 先生的支持并为本书写了精彩的序。在此，表示衷心感谢！我们还要感谢参与整理本书的员工和提出很好建议的销售人员和技术人员。

施耐德电气(中国)有限公司
MENG KING(美) 技术项目经理
李幼涵 技术培训经理

目 录

序

Edito

前言

第1章 基本运动术语 1

1.1 标量 1

1.2 向量 1

1.3 弧度 1

1.4 运动 2

1.5 惯量、动量、力和转矩 3

1.5.1 惯量 3

1.5.2 动量 7

1.5.3 推力 7

1.5.4 转矩 7

1.6 静摩擦——静态阻力 8

1.6.1 滑动摩擦 8

1.6.2 粘滞摩擦力 8

1.7 刚度和弹性模量 8

1.8 机械共振 9

1.9 功 10

1.10 功率 10

第2章 运动机械 12

2.1 离合器 12

2.1.1 最简单的离合器 12

2.1.2 轴向离合器 12

2.1.3 离合器小结 13

2.2 抱闸 13

2.3 齿轮组和齿轮驱动 13

2.3.1 齿轮类型 14

2.4 齿隙 19

2.4.1 谐波齿轮 19

2.5 减速器 20

2.6 链条 21

2.6.1 链轮和链子 22

2.7 传动带和带传动 23

2.7.1 传动带 23

2.7.2 带传动 24

2.8 轴联接器 24

2.9 凸轮 25

2.9.1 凸轮跟随器 25

2.10 滑轮组 26

2.10.1 定滑轮 26

2.10.2 复合滑轮 26

2.11 曲柄 26

2.12 直线执行器 27

2.12.1 动力丝杠 27

2.12.2 滚珠丝杠 27

2.12.3 滚珠丝杠的螺距和 导程 28

2.13 轴承基础 29

2.14 润滑剂 31

2.14.1 油脂 31

2.14.2 固态润滑剂 31

第3章 电磁 32

3.1 电磁场和磁通量 32

3.2 磁通密度 32

3.3 磁场中导体的机械受力 33

3.4 电机设计的目标 34

3.5 磁路 34

3.6 气隙 36

3.6.1 饱和度 36



3.7 转矩生成	36	4.5.6 转矩的产生	62
3.8 转矩大小	37	4.5.7 感应电机转矩——速度 曲线	63
3.9 输出功率	37	4.6 步进电机	63
3.10 能量转换	37	4.6.1 磁阻转矩	63
3.11 等效电路	39	4.6.2 步进电机的基本类型	64
3.12 机器零负载状态	40	4.6.3 步进方案	68
3.13 机器带载状态	41	第5章 反馈装置	71
3.14 理想机器分析的结果	42	5.1 反馈功能	71
3.15 电机的转矩和反电动势	42	5.1.1 分辨率	71
第4章 电机——动力装置	43	5.1.2 精确度	72
4.1 简介	43	5.1.3 可重复性	72
4.2 电机分类	43	5.1.4 分辨率、精度、可重复性 小结	73
4.3 直流电机	44	5.2 同步机	73
4.3.1 直流电机的结构	44	5.3 无刷旋转变压器	74
4.3.2 法拉第定律	46	5.4 有刷旋转变压器	76
4.3.3 换向——带集电环的 单绕组	46	5.5 无刷旋转变压器模式 形态	77
4.3.4 换向——带换向器的 单绕组	47	5.5.1 接收模式旋转变压器—— 反馈相位角	77
4.3.5 换向——带换向器的三 绕组	49	5.5.2 发送模式旋转变压器—— 反馈比率	79
4.3.6 转矩和转矩常数	50	5.5.3 发送模式旋转变压器的 优点	80
4.3.7 一些方程式	51	5.5.4 发送和接收模式旋转变压器 总结	80
4.3.8 电机运行特性	52	5.5.5 多速或多极旋转变压器	81
4.3.9 动态特性	54	5.5.6 旋转变压器的局限性	81
4.4 无刷直流电机(BLDC)	55	5.6 光学编码器	81
4.4.1 无刷直流电机的结构	55	5.6.1 光学增量编码器	81
4.4.2 工作原理	56	5.6.2 绝对光学编码器(单圈)	83
4.4.3 换向顺序	57	5.6.3 多圈绝对值编码器	84
4.5 感应电机	58	5.6.4 绝对编码器总结	85
4.5.1 笼型感应电机结构	58	5.7 光学编码器的局限	85
4.5.2 旋转磁场	60		
4.5.3 定子的旋转磁场速度	61		
4.5.4 定子中旋转磁场的大小	61		
4.5.5 转差	61		



5.8 绝对编码器界面协议	85	附录 A	107
5.8.1 并行输出	85	A.1 闭环控制系统	107
5.8.2 串行输出	86	A.2 简单控制系统	108
5.9 编码器分辨率和电机最大 速度	89	A.2.1 闭环增益 GH 的 重要性	108
第6章 伺服	90	A.2.2 最佳控制系统的总结 ..	109
6.1 伺服的概念	90	A.3 补偿器——PID 控制 模拟	109
6.2 伺服系统	90	A.3.1 伺服系统中的 PID 控制	110
6.3 负载	91	A.4 气隙	111
6.4 稳定性	92	A.5 感应电机等效电路	112
6.4.1 带宽的概念	94	A.6 发送模式旋转变压器电压 输出波形	113
6.4.2 带宽和相位移	95	A.6.1 多速或多极旋转 变压器	114
6.4.3 相位移和闭环控制	96	A.7 解析转换器(RDC) 分辨率图表	114
6.4.4 相位移和多环调节	96	A.7.1 单速旋转变压器的最大 速度	115
6.4.5 带宽——实际的考虑	97	A.7.2 多极旋转变压器的最大 速度	115
6.5 功率装置	97	A.8 统计学中的精确度和 可重复性	115
6.6 反馈装置	97	A.9 大惯量负载振动的 抑制	116
6.7 典型3环串级调节伺服 系统	98	A.9.1 问题的提出	116
6.7.1 全部控制环	98	A.9.2 解决方案	116
6.7.2 伺服环的补偿	101		
6.8 整定控制系统	104		
6.8.1 整定电流环	105		
6.8.2 整定速度环	105		
6.8.3 整定位置环	105		
6.8.4 整定 PI 补偿器	105		
6.8.5 积分增益的实际考虑	106		
6.8.6 速度前馈(VFF)和跟随 误差	106		

第1章 基本运动术语

1.1 标量

在日常生活中，我们碰到的很多内容都可以用数量来描述。如长度、地域、时间和重量都可以用数量的大小来度量内容，这些量我们称为标量。例如：6kg 和 50r/min。

1.2 向量

还有一些内容，我们不仅要用数量描述，还要用方向描述才能完全，这样描述的量，我们称为矢量或向量。例如：电流、速度、力、动量和转矩。

在学习运动控制中向量是一个非常重要的概念，例如，我们说电机每秒转了 20 转。单从这个描述，我们只知道电机的转动速率。这时转动速率是标量，只描述了转动的速率。如果我们说电机每秒正转了 20 转，我们不仅知道了转动的速率，也知道了转动的方向，因此我们说转速是向量。

一个向量通常采用箭头表示。箭头的长度表示向量的大小，箭头的指向表示向量的方向。如图 1-1 所示，无刷电机定子产生的 3 个初始力 (MMF, 即励磁磁力)，它们在定子上的相互相位 A、B、C 为 120° 。这些磁力是在定子绕组中流动的电流产生的。它们的合成力作用于无刷电机的转子上。

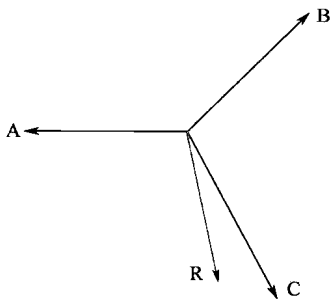


图 1-1 无刷定子的初始力

1.3 弧度

在运动控制的许多技术规范里，测量角度的单位 ($^\circ$) 是很普遍的。然而，在很多应用和技术论述中，另一种对角度的描述更意味深长和方便，这个单位就是弧度。

弧度是对一段圆弧所对应的圆心角进行的度量，也就是说圆心角的两条放射线与圆弧相交的两点间弧长对应的圆心角定义为弧度。



定义：弧长等于圆半径的弧所对应的圆心角为 1 弧度，单位缩写是 rad。由于任何 2π 圆心角对应的圆弧长度都是 $2\pi r$ (r 是半径)，所以任何圆的弧长比半径都是 2π ($\pi \approx 3.14$)。这就意味着任何周长都比直径大。弧长的计算为弧 $\text{arc}(\theta r)$ ，如图 1-2 所示。由于 $2\pi r$ 是 360° 对应的弧长，因此 πr 就是 180° 对应的弧长。

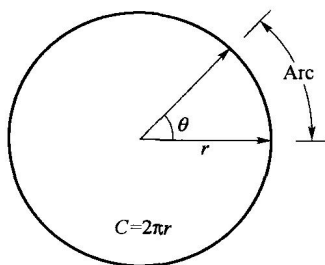


图 1-2 弧度的定义

弧度测量给出了一种用数字表达角度的方式。这种方式在计算由电机产生的角度力或转矩上非常有用。由于 3.14 弧度 (π) 等于 180° ，因此 2.09 弧度就可以转换为大约 120° 。弧度没有测量单位。它们通常表达对一个角度的测量。如果我们有一台电机，它的轴径是 2cm (轴半径是 1cm)，那么电机转一圈，相等的距离 (周长) 是 $2\pi r$ ，即 $2\pi \times 1\text{cm}$ 。如果这台电机以 10r/min 的速度旋转，那么它的线速度就是 $10 \times 2\pi \text{ cm/min}$ 。

1.4 运动

直线运动：当一个物体从一个地点移动到另一个地点，物体就经历了一次位置的变化。这个位置的变化也称为位移。如果你知道了物体运动的起点和终点，你就知道了物体运动的方向和位置变化大小，因此位移是一个向量。

位移是运动的结果。运动可以被认为是一个物体的地点不断变化。运动分为两种基本形式，直线运动就是运动以一条直线运行。圆周运动是一个电机轴的转动。运动的快慢称为速率。由于速率是标量，所以位移的方向不影响速率的计算。当你采用速率和方向描述运动时，你要用到速度的概念，速度是一个具有大小和方向的向量。

加速度描述一个物体速度变化的快慢。只要速度在一定时间内发生变化，就会产生一个加速度。也就是说加速的关键是速度一定要有变化。升速产生一个加速，降速产生一个减速。如果速度保持不变，就不会产生加速或减速，即加速度或减速度值为零。

旋转运动：旋转运动是一个物体围绕一个轴心的运动。通常电机轴的运动就是一个旋转运动。其他还有自行车的车轮或驱动辊等 (见图 1-3)，也是旋转运动。这

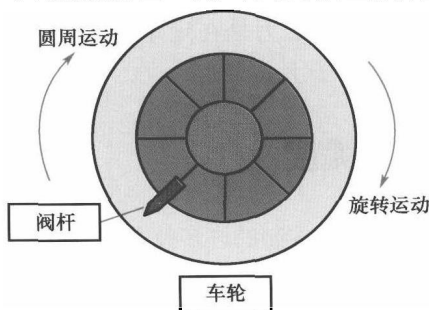


图 1-3 车轮的运动



里要注意的是：圆周运动和旋转运动是有区别的。在圆周运动中，物体的运动是沿着圆弧路径运动的。在旋转运动中，一个车轮以固定轴为中心转动，而车轮的辐条顶部，例如一个连接头，就在做着圆周运动。

角速度被定义为角位移变化的速率，角位移就是一个物体转动的角度，所以角速度等于角位移除以位移所需的总时间。角速度不仅用度/转来测量，同时也要涉及旋转的方向。因此，角速度的概念包含了旋转的快慢和方向。所以，角速度也是一个向量。向量的长度就是速度的快慢。

我们从直线运动的学习中已经知道，要改变运动速度，一定要有加速度。同样，在旋转运动中也是一样。要改变旋转的角速度和方向就一定要角加速度。

1.5 惯量、动量、力和转矩

为了更好地解释惯量、动量和力，我们有必要看看牛顿对运动学贡献的3个定律的解释。

牛顿定律：

- 1) 物体静止将保持静止，物体运动将保持运动不变。
- 2) 加在物体上的力将引起物体速度变化。
- 3) 力和时间的乘积等于冲量(冲力)。

1.5.1 惯量

如果没有外力作用在物体上，它将保持静止或匀速运动。也就是说：没有诸如摩擦力、重力或磁场力的外部力作用，物体可以保持运动不变。保持这种运动状态不变的特性就是惯性，也叫惯量。惯量也有阻碍运动状态变化的特性。地面上一个纸球的惯量比地面上砖的惯量要小很多。

1. 机器上惯性的考虑

为机器选一个合适的电机，考虑一下负载折合到电机的惯量是必要的。加在典型机器上的负载折合到电机轴上的实际效果是减小了驱动器的响应带宽。也就是说：电机的转矩和惯量直接关系到伺服带宽的有效比例。而带宽是反映一个驱动器对输入响应并输出放大调节的不失真能力。

伺服驱动器能良好工作的一个指标是：负载惯量折合到电机轴上应和电机惯量相等。如果折合到电机轴上的惯量大，则会影响伺服的带宽从而带来伺服补偿的变化。通常可接受的负载惯量与电机惯量的比率要小于10倍。比率越小，则响应越快，越适合于机器装备，如：抓取—摆放机器等。

2. 加速度—速度的改变

一个物体的加速度与加在物体上的外力成正比，与物体的质量成反比，与



加速力的方向一致。力是产生速度变化的原因，相反，加速度是力加在物体上产生的结果。当物体质量增加时，为了维持加速度不变，就需要把加在物体上的力也增加。

3. 冲力(冲量)

如图 1-4 所示为当加速度改变时冲力的产生。

在这里，力和作用时间间隔的乘积，我们称为冲量，它是物体加速度变化的比率，与作用力及时间成正比。一个非常大的冲量表明突然加在物体上的力或转矩很大，我们通常称为冲击负载。一个小的冲量表明加在物体上的力作用时间较长。

施加于高尔夫球的冲量取决于击打力及球杆与球的瞬间接触。这就是为什么好的击球动作和自由飞行是同样重要的。也是为什么得到一个一致性好的机械设计必须要采用自动化机器。

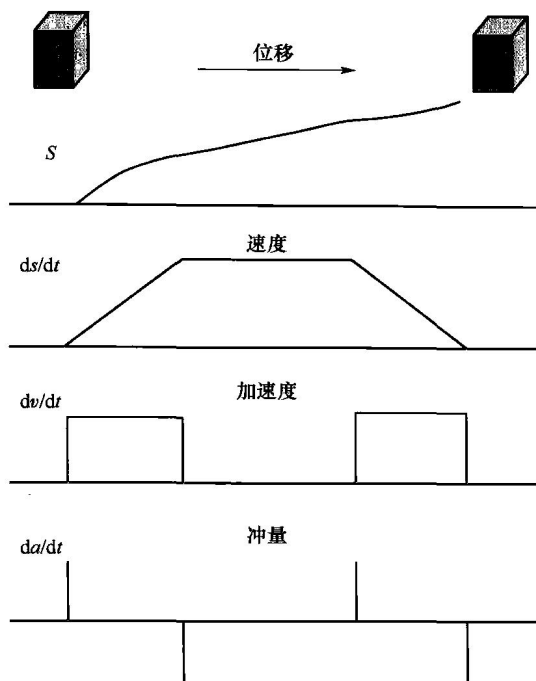


图 1-4 速度、加速度和冲量

当力突然加在弹性系统上，相同的力逐渐施加会引起两次位移冲击。这是因为伺服系统存在齿隙的缘故。齿隙的存在会加重冲击负载的影响(大的冲量)。

在特定的应用场合中，大量的冲量会导致很多无用功。具有慢加速、小质量和高刚性结构的系统一般会抵消这种影响。而具有快加速、平滑响应的系统，大量的冲量会导致振荡和额外能量的消耗，从而使机构磨损加速。

4. 齿隙概述

图 1-5 为齿隙的产生。

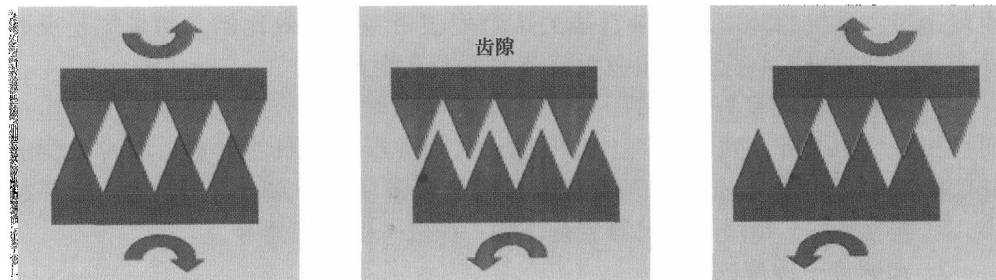


图 1-5 齿隙的产生

- 1) 齿轮减速箱的齿、滚珠丝杠或齿轮—齿条都能产生齿隙。
- 2) 在齿轮减速箱中,当初始齿改变方向时,则齿轮再次啮合之前,第二齿就会产生物理分离。
- 3) 伺服环依特定负载调节。当负载出现离散现象时,稳定性问题就会产生。
- 4) 齿隙也能产生重复性和误差的变化。

5. 别使机器冲动,你冲动了吗?

我们现在知道了只有当加速度变化时,才会产生冲量。在大多数运动控制器中,运动的设计一般会如图1-6所示的梯形运动。速度按上升、下降斜率变化,但要注意:在这种曲线运动中,有两处速度的变化是不连续的。一个是加速度的启动点,另一个是加速度的截止点,这两个不连续点是产生冲量的因素。

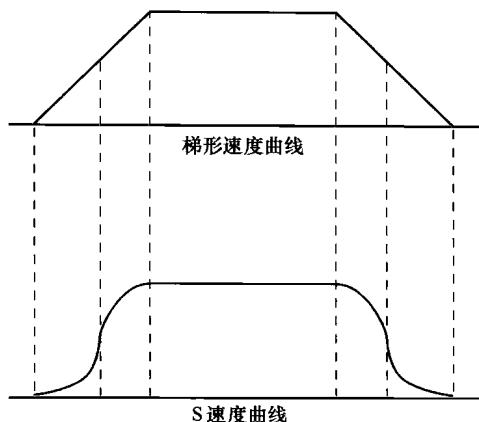


图1-6 S速度曲线

在启动时,从0到一定值,再从一定值回到0的突变会产生加速度变化。通常由于这会产生机械噪声而受到重视。如果这个冲量发生在典型的剪切和加工结束,你就会看到它对工件的影响是显而易见的。

由于这个原因,许多控制器提供了“S”速度曲线,如图1-6所示。有了“S”曲线,冲量就被平滑掉。在大多数应用中,冲量不会带来问题。如有问题,我们就可以用“S”曲线解决这个影响。

综上所述,我们知道“S”曲线加速的优点就是当启动时,加速度为0;当速度以最大变化率增加时,加速度也为最大。这样在加速过程中,就不会出现加速度的离散变化,就不会产生不愿意出现的痕迹。

你要知道!当你选择了“S”曲线,运动要求的峰值加速度比通常的线性加速度要大,这就意味着电机输出的峰值转矩和电流要更大。换句话说,选择的电机、驱动器要能提供更大的峰值转矩和峰值电流。

作为参考,这里给出3种加速类型,如图1-7所示,看看它们是如何表现的。

6. 转动惯量

惯量的影响在线性运动中已经讨论很多了。同理,在旋转运动中,惯量的影响也是一样的。

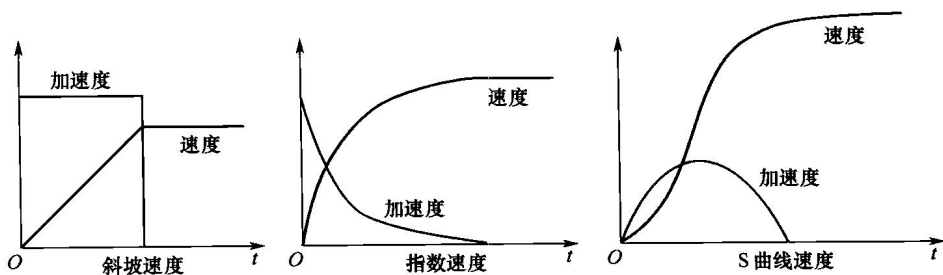


图 1-7 速度曲线的类型

在旋转运动中物体的惯量，我们称为转动惯量。一个轴上转动体的惯量取决于从轴心到运动体的距离。

如果两个同样质量的物体以相同的角速度转动，并且一个物体比另一个物体旋转半径要大，如图 1-8 所示。那么旋转半径大的物体的转动惯量大于旋转半径小的物体的转动惯量。

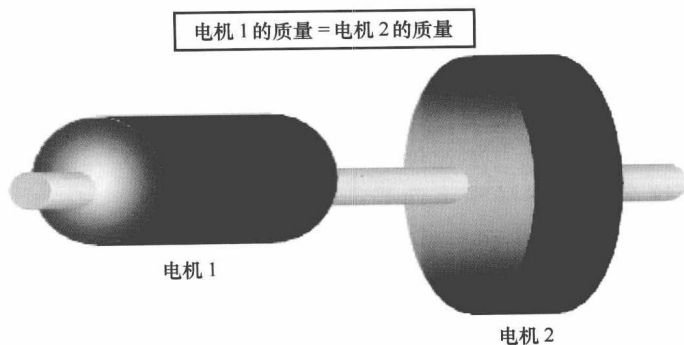


图 1-8 物体的惯量

如果相等的旋转力或转矩作用在两个物体上，它将引起两个物体的角速度变化。由旋转力产生的角加速度取决于物体的转动惯量。

因此，旋转半径大的物体，它的角加速度小于旋转半径小的。旋转半径小的物体因此转速比半径大的物体快。

在旋转运动中，转动惯量既要考虑旋转物体的质量，也要考虑旋转物体的形状。

一个很好地改变转动惯量的例子是花样滑冰运动员的旋转。当滑冰者旋转展开双臂和腿时，增大了身体的惯量减小了角速度。而当手臂和腿收缩时，惯量减小，角速度增大，旋转得很快。



1.5.2 动量

动量与物体的质量和速度成正比，就像停止一列火车要比停止一颗子弹还要费力。火车巨大的质量使它具有更大的动量(和惯量)。而具有同样质量的子弹，用手扔出来和用枪发射出来，后者具有更大的动量。从枪里射出的子弹由于具有巨大的速度而获得更大的动量，但惯量并没有增大。

你一定要知道，对每种机器都有一个限定速度，这是为了使动量不致过大而使机器停止困难及开机带有大量负载而过快运行。

1.5.3 推力

推力是一个反作用力，相互作用的关系在牛顿第二定律和第三定律有阐述。

当力作用在机器的滑块上，如图 1-9 所示，就会使物体产生加速，加速的滑块会产生成比例的反作用力。

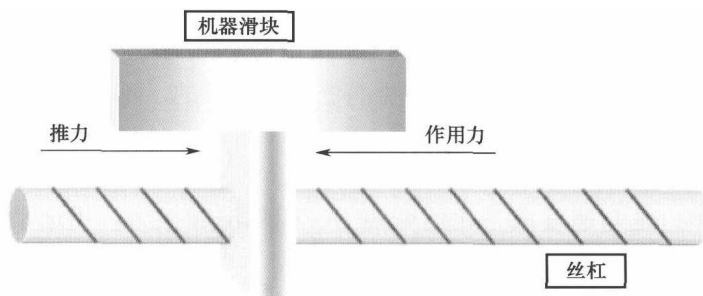


图 1-9 滑块的运动

因此，选择机器上的驱动器和电机是非常重要的，它要保证能提供足够的驱动力来驱动机器部件。通常机器驱动力可以达到 2250 ~ 9000kg。

1.5.4 转矩

转矩是施加在物体上使之旋转的力，它的单位为 $\text{N} \cdot \text{m}$ ，是使物体角度发生位移的物理量。物体的角位移，通常用弧度来描述。如图 1-10 所示。

伺服驱动器和伺服电机的选型是非常重要的。必须要保证选择的驱动器和电机能提供足够的推力来驱动机械滑块及动作要求。有两个要求必须得到满足，一是伺服能够提供足够的推动力，二是满足电机加速要求的转矩。这个转矩是电机设定的加速度和折合到电机轴上的惯量的乘积。

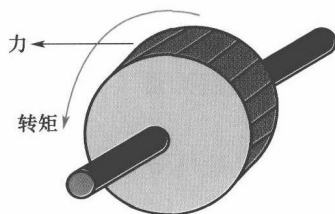


图 1-10 力和转矩