

802377

传感技术大全



6088
404

14

位移长度 角度及速度传感器

《传感技术大全》编辑委员会
李 楚 郑宏才 主编

湖北科学技术出版社

《传感技术大全》14

位移、长度、角度及速度传感器

《传感技术大会》编辑委员会

主 编：李 楚 郑宏才

主 审：许钊杰

编著人员：李 楚 郑宏才 俞 朴 周汉安 李宗岳 顾梅林
程纪娥 傅尚新 徐皓灵 金萃芬 朱佩霞 张福学
陈 军 陶庆模 林腾龙 何华荣 朱文奎 何禹生

湖北科学技术出版社

本分册内容简介

本书详细叙述了各种形式的位移、长度(包括厚度和距离)、角度及速度传感器,如电阻式、电感式、电容式、电涡流式、振弦式、感应同步式、霍尔效应式、磁敏电阻式、编码盘式、陀螺式、喷射式、光栅式、磁栅式、光电式、光纤式、激光式、超声式、微波式、核辐射式、复合式等的工作原理、结构、电路方框图、特殊电路及主要性能。并介绍了几种主要传感器的设计原则和方法。

本书可作为大专院校仪器仪表、自动控制、工业企业电气化、信息工程、计算机等专业学生用的教学参考书,也可供从事传感器生产、使用、电测技术和自动控制、计算机技术等专业的工程技术人员参考与使用。

传感技术大全

位移、长度、角度及速度传感器

李 楚 郑宏才 主编

责任编辑: 陈世泰 李海宁 封面设计: 容乃志

湖北科学技术出版社出版发行

湖北省新华印刷厂印刷

787×1092毫米16开本 23印张 586,000字

1986年12月第1版 1986年12月第1次印刷

印数: 1—5,000

统一书号: 10304·126 定价: 5.10元

《传感技术大全》编辑委员会

主任委员(兼总编): 关定华

副主任委员(兼副总编): 杨霖生 黄俊钦

(以下按姓氏笔划为序)

叶生刚 田胜立 吕虹 何华荣 吴宗岱 林明邦 张德俊 陈杏蒲 周志刚 赵一荣
胡文炯 徐同举 郭以述 樊大钧 魏世钧

秘书: 明代都

委员: (以姓氏笔划为序)

马应贞 王才 王岚 王士良 王文襄 王凤鸣 王云章 王永年 王志正 王洪业
王恩信 王谓源 王鹏程 方建国 方家熊 戈瑜 仇天石 亢宝位 孔德平 叶心华
叶永青 邓春生 邓韵雄 卢宋林 许兴在 许钊杰 许智培 刘琦 刘广玉 刘辅宜
刘世锋 刘恩琪 孙开诚 孙希任 孙体忠 孙德兴 孙德辉 任恕 任峨松 朱定国
庄顺昌 全惠福 李楚 李文琳 李纪文 李光合 李宗岳 李振民 李世联 李世梁
吴良材 吴志鹤 吴庚生 沈寿彭 沈希楼 沈瑜生 何知朱 何叔媚 何蔚瑜 汤定元
汤镛之 严文金 严祜延 冷义顺 宋宗炎 连俊有 巫智方 余瑞芬 张纶 张敏
张凤仙 张凤祥 张开逊 张功铭 张立伟 张南法 张雨时 张祖伟 张桂成 张素娥
张绪礼 张喜勤 陈世泰 陈尧生 陈伟秀 陈行禄 陈志良 陈志清 陈祖培 陈祖耀
陈继述 陈敏贤 杨焜 杨训恺 杨守庚 杨家德 杨雪郁 杨楚生 范良藻 范崇澄
周汉安 周性尧 陆定中 陆品楨 孟广耀 邱永德 林向真 金皖田 武蕴忠 胡永合
胡学胜 俞朴 恽正中 郑宏才 赵国臣 祝炳和 施昌彦 柯象恒 姚锦中 徐其昌
徐哲尧 徐皓灵 顾祈祥 顾梅林 高希才 高启安 桂世功 翁守清 夏丽君 莫金玢
黄启成 黄泽铤 黄得星 黄碧华 曹玲 郭振芹 郭演仪 陶中达 寇云起 傅尚新
傅绮英 傅裕寿 傅德荣 董亮初 董惠泉 程人杰 程纪娥 曾光晰 彭定坤 游国光
鲍敏杭 温殿忠 童斐明 廖延彪 蔡明刚 樊正棠 颜重光 糜正瑜 潘家诚

序

传感器是人类获取各种信息的有力工具，它相当于人的“五官”，是“五官”的伸延。传感器是测量和自动控制中不可缺少的环节。因此随着科学技术的发展，传感器就显得愈来愈重要。它不仅在生产过程、尖端武器、宇航技术方面广泛应用，而且正朝着医疗、环保、交通、家用等领域扩展。在能源与资源开发、生命科学、智能机械等方面无疑将更加广泛地应用和发展传感技术。

在新的技术革命中，正在酝酿着用机器取代部分脑力劳动。作为电脑核心的集成电路正在迅速发展，信息存贮和处理能力高速增长。对“五官”——传感器的要求就特别迫切。大脑发达，五官不灵还是难以进入信息社会的。因此有些技术先进国家把传感技术列为八十年代重要技术之首，这也不是没有道理的。

传感器正在向高精度、小型化、智能化发展，日益使用新技术、新工艺、新材料，成本不断降低，性能不断提高，应用面不断扩大。在我国四化建设中传感器使用日益广泛，加之传感器种类繁多，使用的原理、材料、工艺更是五花八门。对于使用和制造传感器的工程技术人员来说，有一套概要而全面以介绍各种传感器的工作原理、基本特性、结构及其使用，而且能够反映出国内外水平的大型技术工具丛书就是很必要的了。我们邀请了国内各系统的有关专家写成了这套丛书，希望能够对大家有所帮助。由于这套丛书涉及面太广，编写时间也比较短促，不足之处在所难免，希望广大读者批评指正。

本丛书在编写出版过程中，得到了各方面的大力支持，特此致谢。

主任委员：关定华

1985. 9.

《传感技术大全》编写说明

本丛书的目的是希望能帮助有关工程技术人员了解各种传感器的基础原理、典型结构、主要工艺、特性和应用领域，它可供研制、设计和应用传感器的工程技术人员阅读，亦可作为大专院校有关专业的教学参考书。

由于传感技术涉及面极广，本丛书也希望能更方便地为读者服务，因而各分册的划分采用了兼容式的分类法。即：为了系统地阐述一些原理和效应，采用了按功能的分类法为主，但为了便于选用和比较，又以被测物理量(化学、生物量等)的分类法为辅。由于灵活运用其它技术是传感技术的一个突出特点，利用某种功能元件进行其它参量检测的事例极多(如用热敏元件测成分、流量等)，因此有关基础原理部分只在应用最广泛的分册中详述，以避免大量重复；另外，由于许多敏感元件所采用的工艺与材料相似处极多，所以将传感器常用材料及工艺专设一个分册；有关的配套测量仪表也有类似情况，同样另辟一个分册。此外，为了大力推广传感器在各领域的应用，还设置了一个应用例集。全套丛书如下：

- 1 《传感技术基础》
- 2 《力传感器—压力传感器(一)》
- 3 《力传感器—称重和测力传感器(二)》
- 4 《力传感器—振动和加速度传感器(三)》
- 5 《声传感技术与声传感器》
- 6 《光传感器》
- 7 《光纤传感技术与光纤传感器》
- 8 《磁传感器》
- 9 《射线传感器》
- 10 《气敏传感器》
- 11 《温度传感器》
- 12 《湿度传感器》
- 13 《电压敏感元件》
- 14 《位移、长度、角度及速度传感器》
- 15 《液位、流量传感器》
- 16 《化学、生物与医用传感器》
- 17 《传感器常用材料及工艺》
- 18 《传感器典型测量仪表》
- 19 《传感器应用例集》

参与本丛书编写的人员较多，又分处各地，加之时间紧迫，因而不妥之处可能很多，恳请读者给予批评指正。

编 者 的 话

本册是《传感技术大全》的第十四分册，共分四章。第一章位移传感器，第二章长度（含厚度和距离）传感器，第三章角度（含角位移）传感器，第四章速度（含角速度）传感器。本册详述了以上四个方面各类传感器的工作原理、结构、电路方框图（或特殊电路）及主要性能。对有些传感器的设计原则和方法也进行了介绍。

本册所述的各类传感器——位移、长度、角度及速度传感器，是按照被检测的信号参数分类的，目的是想让用户便于查找和选用。而按其工作原理（或主要特征）又可分为电阻式、电感式、电容式、电涡流式、振弦式、感应同步式、霍尔效应式、磁敏电阻式、编码盘式、陀螺式、喷射式、光栅式、磁栅式、光电式、光纤式、激光式、超声式、微波式、核辐射式等，略包括一百余种传感器。

本册作为《传感技术大全》的一册，它和其它分册既有联系又有分工，因此本册凡涉及到在其它分册中主要论述的内容，本册仅作简述，即在保持本册的独立性的同时，对其它分册主要论述的内容，本册在工作原理与结构方面同样叙述，只是在公式推导方面加以精简。

作为《传感技术大全》的一个分册，在内容取舍上尽可能做到“全”，但科学技术不断发展，新的传感器日新月异地出现，因此“全”也只是相对而言。

本册由本册大部分编者初审，主审为长江水利水电科学研究院高级工程师许钊杰同志。由中国科学院合肥智能机械研究所高级工程师杨霖生同志、上海交通大学副教授林明邦同志、清华大学副教授廖延彪同志复审。终审为中国科学院声学研究所所长关定华同志委托的中国科学院武汉物理所副研究员张德俊同志。庄顺昌、屈文选等同志对本册的编写工作提出了宝贵意见。在此一并致谢。

在编写过程中，我们参考了一些书刊，向收入本册的参考文献的作者、译者表示谢意。

在编写过程中，得到了下列单位的大力支持。借此机会向这些单位表示谢意。这些单位是：中国科学院武汉岩土力学研究所、武汉钢铁学院、上海交通大学、清华大学、核工业部第九研究院第四研究所、上海仪表厂、长江水利水电科学研究院、兵器工业部201研究所、北京信息工程学院、武汉水利电力学院水利水电科学研究所、空军后勤部工程设计局、湖北派克密封件厂、中国科学院武汉数学物理研究所。

由于编者水平有限，加上编写时间短促，书中难免有错误和不妥之处，恳请读者批评指正。

《传感技术大全》

※※※※※※※※※※※※※※※※

- 第1分册 《传感技术基础》
- 第2分册 《力传感器—压力
传感器(一)》
- 第3分册 《力传感器—称重
和测力传感器
(二)》
- 第4分册 《力传感器—振动
和加速度传感
器(三)》
- 第5分册 《声传感技术与声
传感器》
- 第6分册 《光传感器》
- 第7分册 《光纤传感技术与
光纤传感器》
- 第8分册 《磁传感器》
- 第9分册 《射线传感器》
- 第10分册 《气敏传感器》
- 第11分册 《温度传感器》
- 第12分册 《湿度传感器》
- 第13分册 《电压敏感元件》
- 第14分册 《位移、长度、角
度及速度传感
器》
- 第15分册 《液位、流量传感
器》
- 第16分册 《化学、生物与医
用传感器》
- 第17分册 《传感器常用材料
及工艺》
- 第18分册 《传感器典型测量
仪表》
- 第19分册 《传感器应用例集》

中国科学院传感技术协作组
机械工业部仪器仪表工业局
电子工业部元器件管理局

联合主办

目 录

第一章 位移传感器	1
§ 1.1 概述	1
§ 1.1.1 基本定义	1
§ 1.1.2 有关公式	1
§ 1.1.3 测量单位	3
§ 1.2 电阻法	3
§ 1.2.1 电位器式位移传感器	3
1. 滑线位移传感器.....	4
2. 线绕电位器式位移传感器.....	4
§ 1.2.2 应变计式位移传感器	10
§ 1.3 电感法	15
§ 1.3.1 差动电感式位移传感器	16
1. 螺管形差动电感式.....	16
2. Π 形和E形差动电感式	17
§ 1.3.2 差动变压器式	18
1. 螺管形差动变压器.....	19
2. 变气隙式 Π 形及H形磁芯差动变压器.....	21
§ 1.3.3 电感调频式位移传感器	22
§ 1.3.4 电涡流式	24
1. 涡流效应.....	24
2. 电涡流形成范围.....	25
3. 电涡流式位移传感器.....	27
§ 1.4 电容法位移传感器	37
1. 变面积式.....	38
2. 变间隙式.....	38
3. 变介质式.....	38
§ 1.5 振弦式位移传感器	44
§ 1.6 编码式位移传感器	50
§ 1.7 感应同步器式位移传感器	53
§ 1.8 光栅式位移传感器	60
§ 1.9 磁栅式位移传感器	65
§ 1.10 光电式位移传感器.....	71
§ 1.10.1 反射式光电位移传感器.....	71
§ 1.10.2 伺服式光电位移传感器.....	72
§ 1.10.3 挡光式光电位移传感器.....	73

§ 1.11 光纤式位移传感器	78
§ 1.11.1 非功能式光纤位移传感器	78
§ 1.11.2 功能式光纤位移传感器	81
§ 1.12 霍尔效应式位移传感器	82
§ 1.12.1 接触式霍尔位移传感器	82
§ 1.12.2 差动霍尔位移传感器	87
§ 1.12.3 非接触式霍尔位移传感器	88
§ 1.12.4 大位移霍尔位移传感器	88
§ 1.12.5 霍尔开关式位移传感器	88
1. 霍尔开关集成电路	88
2. 霍尔开关式位移传感器	91
§ 1.13 磁敏电阻式位移传感器	93
§ 1.13.1 半导体磁敏电阻式位移传感器	93
1. 半导体磁敏电阻及其特性	93
2. 半导体磁敏电阻式位移传感器	94
§ 1.13.2 磁性薄膜电阻式位移传感器	94
1. 磁性薄膜磁敏电阻	94
2. 磁性薄膜式位移传感器	95
§ 1.14 喷射式位移传感器	97
§ 1.14.1 使用喷流空气的测定喷咀	97
§ 1.14.2 喷咀舌门式	98
§ 1.14.3 油压喷咀管式	98
§ 1.14.4 气电复合式位移传感器	99
§ 1.15 激光式位移传感器	99
§ 1.16 复合式位移传感器	102
§ 1.17 气动式大位移传感器	104
§ 1.17.1 有触点式气动大位移传感器	104
§ 1.17.2 无触点式气动大位移传感器	105
§ 1.18 电—气阀门定位器	106
§ 1.19 位移传感器的标定方法	110
§ 1.19.1 位移传感器主要性能指标的定义及数据处理方法	111
1. 线性度 e_f (或称非线性误差)	111
2. 灵敏度 K	112
3. 灵敏限 Δx_s	113
4. 分辨力和分辨率	113
5. 重复性 e_r	113
6. 迟滞误差(回差) e_c	113
7. 温度误差	114
8. 稳定度	115
9. 影响系数	115

10. 精确度	115
11. 量程	120
12. 输入阻抗和刚度	120
13. 阶跃响应	121
14. 频率响应	126
§ 1.19.2 标定方法	129
§ 1.19.3 温度误差的标定	127
1. 温度标定设备	129
2. 温度标定步骤及实例	129
§ 1.20 各种形式位移传感器的比较及发展方向	132
参考文献	134
第二章 长度、厚度传感器	136
§ 2.1 概述	136
§ 2.1.1 基本定义	136
§ 2.1.2 测量单位	136
§ 2.2 电阻式	136
§ 2.3 电感法	137
§ 2.3.1 电感式	137
§ 2.3.2 电涡流式	137
1. 反射式电涡流测厚	137
2. 透射式电涡流测厚	138
§ 2.4 电容式测厚传感器	139
§ 2.5 核辐射法	141
§ 2.5.1 x 射线透射式测厚	141
§ 2.5.2 x 射线绕射式测厚	144
§ 2.5.3 放射性同位素测物位	145
§ 2.5.4 γ 射线透射式测厚	148
§ 2.5.5 β 反散射测厚	150
§ 2.6 超声式	151
§ 2.6.1 超声物位计	151
§ 2.6.2 双探头法测液位及超声测厚	154
1. 双探头法测液位	154
2. 超声测厚	155
§ 2.6.3 超声波测相界面位置	156
§ 2.7 微波式测厚测长传感器	157
§ 2.7.1 微波式测厚仪	157
§ 2.7.2 微波式物位传感器	158
§ 2.8 激光式	161
§ 2.8.1 激光衍射法测镀层厚度	161
§ 2.8.2 激光调制法测距	163

§ 2.8.3 激光雷达测距	164
§ 2.8.4 激光扫描法测厚	166
§ 2.8.5 激光量子干涉测长	167
§ 2.8.6 激光全息显微测长	167
§ 2.9 光电式	170
§ 2.9.1 反射法检测材质表面缺陷	170
§ 2.9.2 透射法检验材质孔、径尺寸	170
§ 2.9.3 光电准直定位	170
§ 2.9.4 光电轮廓传感器	171
§ 2.9.5 光电跟踪图形传感器	173
§ 2.10 空气测微计	174
§ 2.11 光纤式图象传感器	176
§ 2.12 电容式测孔传感器	176
§ 2.12.1 环形测孔传感器	176
§ 2.12.2 单向、双向测孔传感器	178
1. 单向测孔传感器	178
2. 双向测孔传感器	180
§ 2.13 临近传感器	180
§ 2.14 标定方法	182
§ 2.14.1 核辐射测厚的标定	182
§ 2.14.2 超声式传感器的标定	183
§ 2.14.3 激光式传感器的标定	184
§ 2.15 各种形式的测长、测厚传感器性能比较及发展方向	184
参考文献	188
第三章 角度和角位移传感器	189
§ 3.1 概述	189
§ 3.1.1 基本定义	189
§ 3.1.2 有关公式	189
§ 3.1.3 测量单位	189
1. 弧度制	189
2. 六十进制	189
3. 百进制	189
4. 密位制	189
§ 3.2 电阻法	190
§ 3.2.1 线绕电位器式	190
§ 3.2.2 非线性绕电位器式	193
§ 3.2.3 光电电位器式	197
§ 3.2.4 风标式	199
§ 3.2.5 压差归零式迎角传感器	202
1. 归零风标式	202

2. 压力比式	202
3. 压差归零式	202
§ 3.2.6 应变计式	204
§ 3.2.7 流向方位传感器	205
§ 3.3 电感法	206
§ 3.3.1 旋转变压器式	206
§ 3.3.2 自整角机	214
§ 3.3.3 电感移相器	222
§ 3.3.4 微动同步器式	224
§ 3.3.5 多极角度传感电机简介	229
§ 3.4 电容法	229
§ 3.5 感应同步式	230
§ 3.6 光栅式	234
§ 3.7 磁栅式	236
§ 3.8 编码盘式	238
§ 3.8.1 绝对式编码器	238
§ 3.8.2 增量式编码器	240
§ 3.9 陀螺式	246
§ 3.10 倾斜角传感器	249
§ 3.10.1 参量式倾斜角传感器	249
1. 应变式	249
2. 电位器式	250
3. 电感式	250
4. 液体摆式	250
§ 3.10.2 振弦式倾斜角传感器	253
§ 3.10.3 力平衡式倾斜角传感器	254
§ 3.11 激光式	255
§ 3.12 标定方法	257
1. 度盘	257
2. 多面棱体	257
3. 光学分度头	258
4. 分度台(圆转台)	258
5. 激光迈克尔逊干涉仪	258
6. 光栅盘光电检查仪	258
§ 3.13 各种角度传感器的性能比较及发展方向	259
参考文献	261
第四章 速度传感器	262
§ 4.1 概述	262
§ 4.1.1 基本定义	262
§ 4.1.2 有关公式	262

§ 4.1.3 测量单位	262
§ 4.2 磁电式	263
§ 4.2.1 感应式速度传感器	263
§ 4.2.2 动铁式	266
§ 4.2.3 磁电式转速传感器	267
§ 4.2.4 电涡流式	269
§ 4.2.5 磁性转速表	271
§ 4.2.6 电磁速度传感器	271
§ 4.2.7 测速发电机	274
§ 4.3 电容法	278
§ 4.3.1 电容式速度传感器	278
§ 4.3.2 电容式转速传感器	279
§ 4.4 光电式	280
§ 4.4.1 光电转速传感器	280
§ 4.4.2 示速器圆盘	282
§ 4.5 萨沃纽斯(Savonius)流速传感器	282
§ 4.6 速度陀螺	284
§ 4.6.1 转子陀螺	284
§ 4.6.2 压电陀螺	288
1. 振梁型压电角速度陀螺	288
2. 双晶片型压电角速度陀螺	290
3. 圆管型压电角速度陀螺	293
§ 4.6.3 激光陀螺	295
§ 4.6.4 光纤陀螺	296
§ 4.7 风速传感器	297
§ 4.7.1 电晕离子式	297
§ 4.7.2 射线离子式	299
§ 4.7.3 热敏电阻式	301
§ 4.7.4 热线式	302
§ 4.7.5 叶片式或其它	304
1. 叶片式	304
2. 热球式风速传感器	304
3. 风杯式	304
§ 4.8 流速传感器	305
§ 4.8.1 电阻式旋桨流速传感器	305
§ 4.8.2 光电式流速传感器	306
§ 4.8.3 电磁式流速传感器	307
§ 4.8.4 热膜式流速传感器	308
§ 4.9 多普勒效应测速	309
1. 测定星球相对地球的运动速度	310

2. 多普勒雷达测速	311
3. 多普勒声纳测船速	311
4. 超声多普勒血流计	311
§ 4.10 相关测速	312
§ 4.11 空间滤波器测速	314
§ 4.12 离心式转速表	315
§ 4.13 霍尔开关测速	317
§ 4.14 差动变压器测速	318
§ 4.15 速度、角速度传感器的标定方法	319
1. 速度传感器的绝对标定法	319
2. 速度传感器的相对标定方法	321
§ 4.16 各种测速形式的传感器性能比较及其发展方向	321
1. 速度测量类型	321
2. 速度测量方法	322
3. 各种测速形式的传感器性能比较及其发展方向	323
参考文献	327
附录一 关键词索引	328
附录二 常用单位及换算	334
1. 国际单位制(SI)	334
2. 与国际单位制并用的单位	335
3. 常用单位与 SI 单位换算关系	337
附录三 传感器举例	340
附录四 传感器举例	340
附录五 传感器举例	341
附录六 传感器举例	341
附录七 传感器举例	341
附录八 传感器举例	342
附录九 传感器举例	343
附录十 传感器举例	344
附录十一 传感器举例	345
附录十二 传感器举例	346
附录十三 传感器举例	347
附录十四 传感器举例	347
附录十五 例传感器举	348
附录十六 传感器举例	349
附录十七 传感器举例	350
附录十八 传感器技术服务	351

第一章 位移传感器

§1.1 概述

线性位移传感器是将被测物体作直线运动时的位移量转换为电量或其他可测量的器件。它在各种机械量位移的检测及科研部门中有着广泛的应用。

在科研及生产过程中,被检测的机械量的位移,以量程大小为例,从微米数量级到米数量级都有。被检测的物体,有需接触测量的,也有非接触测量的。因此,人们创造了各种形式的线性位移传感器,来适应不同场合的需要。为了便于读者了解位移量测量技术的概貌,本章将一些成熟的或被确认有发展前途的位移传感器,一一加以介绍。其中有电阻式、电感式、电容式等十多种。

本章叙述了它们的工作原理、结构、电路方框图及主要性能。其中有些传感器由于在其它物理量的检测中应用更为广泛,因此它们的工作原理由《传感技术大全》中的有关分册详述,这里只作简介。对于通用工艺和通用电路由《传感技术大全》中的《传感器常用材料及工艺》、《传感器典型测量仪表》两分册叙述。

§1.1.1 基本定义

位置——物体(或质点)某瞬时在选择定的参照物坐标系上所处的坐标。

位移——物体(或质点)于某段时间内,在选择定的参照物坐标系上所处境置的增量。它为一矢量,方向由初位置指向末位置。

线性位移——物体作直线运动时的位移。

位移是矢量(有大小,有方向),相加减时遵守平行四边形运算法则。

§1.1.2 有关公式

由于位移可从它与速度、加速度的关系式中获得,所以对于线性的(平移的、直线的)位移、速度和加速度之间有如下关系:

$$\vec{v} = \frac{d\vec{s}}{dt} \quad (1.1-1)$$

$$\vec{a} = \frac{d^2\vec{s}}{dt^2} \quad (1.1-2)$$

式中 \vec{v} —线性速度(米/秒);
 \vec{a} —线性加速度(米/秒²);
 \vec{s} —线性位移(米);
 t —时间(秒)。

由式(1.1-1)可知,当物体在平面坐标系内作匀速直线运动时,其位移的大小为

$$\vec{s} = \vec{v} t \text{ (米)} \quad (1.1-3)$$

式中 \vec{v} —物体的运动速度(米/秒);
 t —物体产生位移 \vec{s} 所需时间(秒)。

位移 \vec{s} 的方向和物体运动时的速度方向相同。

物体在直线上作匀变速运动时的位移大小为

$$\vec{s} = \vec{v}_0 t \pm \frac{1}{2} \vec{a} t^2 \text{ (米)} \quad (1.1-4)$$

式中 \vec{v}_0 —物体运动时的初速度(米/秒)；

\vec{a} —物体运动时的加速度(米/秒²)。当物体作匀加速运动时， \vec{a} 为正值，上式中的“±”号应取“+”号，当物体作匀减速直线运动时，上式中的“±”号应取“-”号；

t —物体产生 \vec{s} 位移所需的时间(秒)。

物体位移的方向和物体运动方向相同。

物体在垂直于地球表面的方向上作自由下落时，位移的大小为

$$\vec{s} = \frac{1}{2} \vec{g} t^2 \quad (1.1-5)$$

式中 \vec{g} —重力加速度(米/秒²)。它的方向垂直于地面向下，它的大小随地区不同而略有不同。例如，在北极 $g = 9.832$ 米/秒²，在赤道 $g = 9.780$ 米/秒²；北京 $g = 9.801$ 米/秒²，广州 $g = 9.788$ 米/秒²；上海 $g = 9.794$ 米/秒²，武汉 $g = 9.794$ 米/秒²；纽约 $g = 9.803$ 米/秒²，莫斯科 $g = 9.816$ 米/秒²，东京 $g = 9.798$ 米/秒²。一般常取 $g = 9.80$ 米/秒²。

t —产生位移 \vec{s} 所需时间(秒)。

位移方向垂直于地面向下。

当物体作简谐运动时，位移、速度、加速度三者的换算关系如下：

$$s = s_0 \sin(\omega t + \phi_0) \quad (1.1-6)$$

式中 s_0 —位移幅值(厘米)；

ω —简谐运动的角频率， $\omega = 2\pi f$ ， f 为简谐运动的频率(赫兹)；

ϕ_0 —物体作简谐运动初始相位(弧度)；

t —发生位移 s 所需时间(秒)。

当物体从平衡位置开始作简谐运动时， $\phi_0 = 0$ ，此时有

$$s = s_0 \sin \omega t \quad (1.1-7)$$

将式(1.1-7)对时间求导数，可得到简谐运动速度大小为

$$v = \frac{ds}{dt} = \omega s_0 \cos \omega t \text{ (厘米/秒)} \quad (1.1-8)$$

式中 ωs_0 —速度 v 的幅值(厘米/秒)。

将式(1.1-8)对时间 t 求导数，则得到加速度大小为

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2s}{dt^2} = -\omega^2 s_0 \sin \omega t \text{ (厘米/秒}^2\text{)} \quad (1.1-9)$$

式中 $\omega^2 s_0$ —加速度 a 的幅值(厘米/秒²)。

由式(1.1-7)、(1.1-8)和(1.1-9)可以看出，速度的相位较位移的相位超前 90° ，加速度的相位较位移的相位超前 180° (即二者反相)。反之，若已知作简谐运动的速度和加速度，则可求得相应的位移。

例如，当 $v = v_0 \sin \omega t$ 时，则位移大小为

$$s = \int_0^t v dt = -\frac{1}{\omega} v_0 \cos \omega t \quad (1.1-10)$$

式中 v_0 —为 v 的幅值。