

基本館藏

263174

會繼鐸編

控制用途电机概论



上海科学技术出版社

內 容 提 要

书中从使用目的的角度，以关于动力用途电机的知識为基础，論述了控制用途电机的原理、特性、用途和一般結構。全书計分六章，涉及了整步电机、阻旋变压器、伺服电动机、測速发电机、旋轉放大机和转矩电动机；并介紹了一些关于自动控制理論的基本知識。

这本书是适应大学电机学的教学需要，作为电机学的补充教材的，但这里所涉及的电机，在自动控制系统中占有重要的地位，对从事自动化和电机制造等業務的同志，也会有一定的参考价值。

控制用途电机概論

曾維寧 編

*

上海科学技术出版社出版

(上海南京西路2004号)

上海市书刊出版业营业許可證出D93号

新华书店上海发行所发行 各地新华书店經售

上海市印刷五厂印刷

*

开本757×1092 1/32 印張2 28/32 字數66,000

1959年12月第1版 1959年12月第1次印刷

印數1—2,000

統一書号: 15119 · 1364

定 价: (十四)0.12元

序

这本书是应大学电机学的教学需要而写的。书中討論了控制用途电机的理論与实际。我们知道，从这一类电机問世以来，电机学和自动控制已經結下了不解姻緣；这个事实使得电机学和电机工业在这方面获得一个重要的发展。在这种形势的影响下，大学电机学科的内容已不得不涉及这些电机。現在，中国人民正在党的领导下，鼓足干劲、力爭上游、多快好省地建設社会主义。交通、国防和工农业生产自动化的要求，已經提到日程上来了。有关自动化的专业，也在大专学校里設置起来了。在当前的形势下，毫无疑问，修习电机学的学生，特别是那些有关自动化和电机制造专业的学生，对控制用途电机方面知识的需要，也就更加迫切了。然而，目前的电机学教科书中，关于控制用途电机的材料，纵未完全忽略，大抵語焉不詳，不足适应这一需要。本书就是基于这样的考虑而写的。作者企图使这本书成为电机学的补充教材，希望它能够在提高电机学教学质量，适应新形势方面，有涓滴的作用。

从基本原理的角度看来，用于控制目的的电机和用于动力目的的电机并无实质上的差别，因而可能运用同样的原理去理解它們的理論与行为。根据写这本书的目的，可以假定，讀者已經掌握了关于后者的知识；因而书中在討論控制用途电机理論时，尽量以动力用途电机的理論为基础。然而，控制系统对組成它的电机的要求特殊，同电力系统对动力用途电机的要求迥然不同；不仅这一类电机的特性需要多种多样，它們的动作反应，更需要迅速而准确。

控制用途电机必須忠实执行控制规划所界予的任务。同

动力用途的电机相比,它们的功用奇特,功率水平极低,体态小巧,结构殊异。研究这一类电机,必须从控制的理论和规划着手。针对这种情况,本书在绪言中,首先介绍了一些关于自动控制理论的基本知识;自绪言以下,根据电机在自动控制系统中所充任的角色分类编章,并从使用目的的角度去论述它们的原理、特性、用途和一般结构。

很凑巧,这样的分章方法很自然地把作用原理类似的电机并在一起,而把不同的分开了。第二章所述的整步电机,全部可以用变压器的原理去理解。严格地说,它们和变压器不同,不是静止的电器;但其中所发生的电磁感应现象,却同在变压器中所发生的一样。自第三章至第五章中所涉及的电机,都依旋转磁场的原理运行。第六章所涉及的转矩电动机则是继电器式的电机。

应该说明,本书所涉及的并不是这一方面的全部电机,但已罗致了从实用的角度说来比较主要的资料。此外,由于我国对这一方面的工作尚在开始阶段,未能获得一些国产成品的图样和数据,以充实本书的内容;只能从手头有的外国文献中,摘录一些产品数据和图表,来帮助读者理解控制用途电机生产的情况。鉴于这一方面的事业正在飞跃发展,可以逆料,这些数据和图表所反映的情况,可能已经过时;但从教学的要求来说,似乎无伤于大体。

在这本书的写作和出版方面,作者十分感谢教研组党领导和同志们所给予的鼓励和帮助。

写这本书时,还从一些文献中,获得所需的资料,并受到可贵的启发。谨在书末附录那些曾经涉猎的主要参考文献,借以向那些作者志谢。此外,由于作者的浅陋,书中的舛误必多,渴望读者不吝指正。

作 者 一九五九年八月

目 录

序

第一章 緒言

1-1 关于自动控制系统.....	1
1-2 闭环式自动控制原理.....	3
1-3 控制用途电机.....	5

第二章 整步电机与回旋变压器..... 7

2-1 引言.....	7
2-2 山字形变压器.....	10
2-3 袖珍同步机.....	13
2-4 整步发讯机.....	14
2-5 整步控制变压器.....	16
2-6 图 2-4 的近似分析.....	19
2-7 整步系统的误差.....	20
2-8 整步系统的剩余电压.....	22
2-9 整步系统的相位移.....	23
2-10 整步电动机.....	24
2-11 参差整步变压器和电动机.....	26
2-12 回旋变压器.....	28
2-13 激励电源.....	32

第三章 伺服电动机..... 33

3-1 引言.....	33
3-2 直流伺服电动机.....	34
3-3 直流并激伺服电动机的控制方法.....	36
3-4 关于直流串激伺服电动机的控制.....	40
3-5 交流伺服电动机.....	41

3-6 二相伺服电动机的运行特性.....	45
第四章 测速发电机.....	50
4-1 在伺服机构中的功用.....	50
4-2 测速发电机的结构.....	52
4-3 交流测速发电机的运行特性.....	53
4-4 直流测速发电机的运行特性.....	56
4-5 用作微分机和积分机.....	58
第五章 旋转放大机.....	60
5-1 引言.....	60
5-2 功率放大机的结构与原理.....	61
5-3 功率放大机的静态特性.....	64
5-4 功率放大机的动态.....	65
5-5 功率放大机用途举例.....	68
5-6 转控机与调整机.....	70
5-7 转控机的变换函数.....	72
5-8 交流旋转放大机.....	75
5-9 相序可变的二相发电机.....	80
第六章 转矩电动机.....	82
6-1 无极性转矩电动机.....	82
6-2 极化的转矩电动机.....	85
6-3 微变电动机.....	85
主要参考文献.....	88

第一章 緒 言

1-1 关于自动控制系统

“控制系统”一詞的意义极为广泛；它可以用来说明象控制照明、駕駛汽車等等最简单的情況，以至于发射宇宙卫星等等很复杂的情況。这里面包括了人工控制和自动控制。所謂人工控制意味着需要人去运用控制机件，使工作机械照它的特性完成任务。自动控制系统却是利用控制机件的复杂組合，不需人參預其间，而能使工作机械照人们所預定的程序行事。近年以来，不仅近代工农业、运输以及国防事业需要良好控制系统的事实，使自动控制系统的地位日趋重要；而自动控制系统本身的日益精密，更促进了这些事业大大的发展。

但是，不論自动控制系统的用途怎样广泛，它的组织如何复杂，我们还可以把所有的自动控制系统分成两类不同的型式。第一类是所謂开环的控制系统，第二类称为閉环的控制系统。在开环的控制系统中，控制元件的动作，实际上同被控制机械实在的行为无关；而在閉环的控制系统里，控制元件的动作却受着被控制机械实在行为的影响；理論上，除非被控制机械的实在行为和所期望的行为吻合，控制元件永不会停止动作。

最好举几个例子来说明。假定我们需要把工作机械的速度維持在某一特定的数值上，現在选用了一台励磁固定、而电樞电压可以調节的并激直流电动机作为原动机。如果这台电动机所固有的速度調整特性足够好，我们只要把它的电樞端

压保持在某一适当的数值上就够了；因为并激电动机在磁流恒定时，它的电枢电压就是速度的相当准确的量度。如果它的速度调整特性不够好，我们可以在电压调整器上加入补偿电枢电阻压降的量，使电压调整器适应电枢电流的变化，恰当地增加电枢的端压，以补偿因负载增加而增加的电枢电阻压降，从而使电枢的内生电压实质上不变，以获得比较恒定的转速。这样的控制程序，无疑是自动的。然而，电动机的实在速度并不影响控制元件的动作；换句话说，电动机没有给控制机构指出它是否准确地完成了所指定的任务，因而控制机构也就无法纠正可能发生的误差。由于缺乏这种直接的情报或信号，从上述的定义看来，这里的两个控制方法都是属于开环式的。在这些情况中，要电动机丝毫不爽地运行于所期望的转速，所有置于控制盘到电动机转轴之间的全部器械的特性，必需能够不受外来因素的影响，绝对保持于控制规划所要求的数值；但是，象温度变化、磁滞、电枢反应以及电源变化等等一类孕育在系统之中的扰动影响，都不免或多或少地改变各项器械的特性，招致转速的误差。

如果要克制这些外来因素的影响，以获得对电动机转速更准确的控制，可以用一台测速发电机和电动机的转轴耦合，通过它的电压来测定电动机的实在速度，并采用适当的装置来比较这个电压和那个同所期望的速度成正比的输入电压，利用它们之间的任何误差作为动作信号，务使电动机坚持所期望的转速。这样一来，我们就得到了闭环式的控制系统了。从这个例子可以明了，这种闭环式控制系统的主要特征，就是具有那个由被控制机械连到控制元件的反馈链环。在目前的情况中，所谓反馈链环，就是那个用测速发电机的电压影响电动机的控制电压的附加程序。这个附加的程序显然给控制系统一种纠正误差的能力。

从上面的例子和说明，我们可以粗略地了解自动控制系统是什么东西。虽然在这里和以后，我们只谈到同电机有关的自动控制，虽然事实上自动控制和电机有不可解的姻缘，但绝不能理解自动控制系统全部属于电的。我们所以要这样做，无非是想从了解控制用途电机的角度去了解自动控制系统罢了。

1-2 闭环式自动控制原理

在所有的自动控制系统中，闭环式控制是一个最复杂、最精确、使用电机最多的系统。在上节中，已经谈到这种控制系统的一个本质；现在，为了便于了解那些用于自动控制系统中的电机的特性，有必要对闭环式控制的基本原理进行一些初步的分析。

为了容易解说，我们将把注意力集中在电气化的闭环式控制，并先以位置控制（即一般使用自整角机的控制）为例来说明它的原理。虽然这样的限制有时会使我们失去对这种控制系统来说有用的深广概念，但就本书的目的来说，我们可以不必走得太远。



图 1-1 闭环式控制系统原理图

现在，假定我们的命题是要求一根转轴重现另一根控制转轴的位置。为了达到这个目的，我们可以采用象图 1-1 所示的控制系统。这是一个简单的示意图，用以表示闭环式控制系统的一般原理。图中标示的控制信号 v 在我们的假定中代表控制转轴的位置；在实际的控制装置中，它已经变换为电

压,輸入控制系统。被控制参数 c 代表被控制机械,例如电动机的轉軸的实在位置。为了要比較所期望的轉軸位置和实在的轉軸位置, c 这个量必須通过适当的装置,反饋到控制机械。这台用以比較輸入和輸出轉軸的位置的装置,在系统中称为誤差檢測器。誤差檢測器同时接受控制信号 v 和反饋的被控制参数 c ,使得实在的轉軸位置能够在它那里同所期望的轉軸位置进行比较;如果它们之间存在着誤差 $e = v - c$,这个誤差就是动作信号,能够通过控制机械,使被控制的电动机轉軸的位置达到所期望的结果。在当前的例子里,如果所采用的誤差檢測器具有接受不同信号的能力,可以讓电动机的轉軸位置通过齒輪系統去直接影响它;不然,便須把位置信号也变换为电压,然后进行反饋。

如果改变我们的命題,要求电动机追随着控制信号旋轉,具体的情况固然不同,控制的程序却无二致。此外,在实际的电控制系统里,控制信号和被控制参数都不外于位置和速度(其他性质的信号也可以变成这种性质),所以,上述的控制程序适用于各种控制。虽然实际中的控制綫路多得不胜枚举,所用的閉环也不限于一个,但可以说,它们的基本面貌不过如此,分析細節的許多方面也完全相同。

总之,閉环式控制系统不过是用来保持控制信号和被控制参数之间的某种函数关系的机构罢了。为了完成这样的任务,被控制参数必須测量并和控制信号比較;如果其間有誤差,必須能够发出相应的动作信号,通过控制机械的作用去消灭这个誤差。如果把它比作动物的神經系統,其中仿佛有一个神經中樞,那就是誤差檢測器。

从上面的敘述看来,閉环式控制系统还可以再区分为两类。如果控制信号 v 实质上維持恒定,即使不然,也只遭受着比較緩慢的变化;这样的控制系统区别为調整器系統。調整

器的主要功用是防止外来的效应影响被控制参数 c ；通用的发电机电压调整系统就是一个例子。如果控制信号 v 迅速地变化，那系统就称为伺服机构；它的功用是使被控制参数 c 尽可能忠实地跟着控制信号 v 而变化。

应该指出，即使采用了这种控制系统，工作机械的实在行为和所期望的行为之间还不能没有误差；不过，运用这种控制机构，我们有可能把那些不可避免的误差限制到允许的范围之内。所以，在近代的动力输送、航海、航空、精密加工、原子能控制与利用、测量与计算技术以及国防武器的运用各方面，闭环式的控制系统已经逐步地代替了其他的自动控制系统。这个事实也促成了电机学一个方面的重要的发展。

1-3 控制用途电机

事实上，构成自动控制系统的元件是多种多样的。单就误差检测器来说，就有电的、机械的和流体的。但是，本书的目的却限于研究适用于自动控制系统的特种电机。根据这个目的，我们要讨论的将是一些结构特殊（对动力用途的电机而言）、专为控制用途设计的可旋转的电机。这并不意味着普通结构的电机不能用于控制系统，因为事实上已经有许多小容量普通结构的电机也广泛地用于控制目的；如果再广义地就电机本身就是一个控制系统来看，那更不用说了。

设计或选用这一类电机时，必须严格地考虑控制规划对它们的要求。例如，虽然任何电机的输出量和输入量之间都有某种函数关系，而就用于控制目的的电机的要求来说，它的输出必须是输入量的一个量度，其间的函数关系需要尽可能固定，而且还涉及反应的速度和准确度问题。单就这一个要求而言，这一类电机必须对输入信号准确而迅速地反应，对外来因素的干扰不灵敏，运行稳定，不摇摆。为了适应这个要求，

除了制造工艺需要特別精巧之外,其他如鉄的非綫性性质、渦流及磁滯損耗、時間常數与灵敏度、內阻尼、摩擦与風損、轉動慣性以及溫度的影响等等,对动力用途的电机說来,可能是不影响本质、有时甚至可以忽略的因素;但对控制用途的电机而言,便可能成为突出的重要問題。至于体积、外形、重量等等因素,自然也是这一类电机必須适应个别情况的特殊問題。

为了适应控制系統的要求,控制用途电机的特性是多种多样的。以誤差檢測器为例,它必須同时接受控制信号和被控制参数,并輸出动作信号,而这些信号又常常具有不同的物理性质,用于这种場合的电机就必須能够把这些物理量进行綫性的变换和綜合。此外,这些量都是低功率的量,而被控制机械又常常需要功率水平較高的控制信号来驅动,如果采用电机来充当放大机,它的放大系数应该是綫性的。在这里,我們不能把每一种情况都談到并且說得很清楚,但上述两个例子可以給我們一个印象,控制用途电机的特性相当复杂,并且需要穩定和准确。此后各章將討論所涉及电机的每一个特性。

要在任一特定的控制系統中了解从实在行为的測量开始,經歷放大与控制全部所碰到的連續反应,可以把組成这个系統每一元件的特性迭加起来研究。学习控制課程时,我們懂得,这种重迭法所涉及的特性必須是动态的;因为反应的速度、运行的穩定度以及搖摆的避免等等,都是決定重要現象而又緊密地連系着的动态問題。因此,我們对所涉的电机,將同时討論它們的靜态特性和动态特性。

由于这些电机是某一控制系統的組成部分,而它們的运行情况又密切联系着,我們在研究某一电机时,应该有控制系統全部历程的整體概念。

第二章 整步电机与回旋变压器

2-1 引言

在遙远測量、电子計算机以及其他电气化的自动控制系统中,常常采用特种电磁耦合的装置,成对地配合,使一根或几根轉軸追隨另一轉軸旋轉,或重現它的角位。虽然整个系统的功用相当于使这些轉軸有机械的耦合,但在现实的情况中,这些轉軸不是距离遙远,就是功率水平不同,使得机械耦合的办法不是不可行,就是难期有效。从电控制系统一般的工作程序看来,首先須將控制轉軸的角位变为电压信号,然后通过控制机械去使被控制的轉軸重現控制轉軸的角位或速度。如果想获得更精确的控制而采用伺服机构,例如,象在第1-2节里所指出的一样,还要具备誤差檢測系统,把这个信号和被控制轉軸的輸出相比,并輸出表征它們之間的誤差的動作信号电压。一般用来在控制系统完成上述任务成对配合的电磁装置,其功用虽有发訊和收訊之分,但它们的共同目的是使两根轉軸同步,所以統称为整步电机*。

* 由这些电磁装置成对配合而成的联合装置,俄文名称是 Селсинны,英文中则有 Selsyn、Synchro 和 Autosyn 等多种名称。在中文文献中,常称这种联合装置为自整角机;有时还把作为它們元件的电机称为自整角机,或冠以自整角字样。作者意見,依照这种联合装置的功用(請參閱 2-5、2-10 和 2-11 节),它們可以称为整步示位器或誤差檢測器。前者有自整步的作用,当然也可以称为自整角机,但后者必須和伺服电动机联在一起(有时还須加上放大机),才能够自整步,获得自整角机这个名称。所以“自整角机”这个名詞,照它的意义來說,最好作为說明那些在自动控制系统中充當位置控制的裝置的总称;对于上述那些联合装置,似乎已不很确切。至于那些作为它們的元件的电机,更不适合了。基于这个看法,采用“整步电机”作为这些电机的总称。

这个名称可能不妥当,还有待于集思广益,再行訂正。

所謂“整步电机”，是一个用以说明其結構类似于感应調整器、能使两根轉軸同步的控制用途电机的总称。从感应調整器的結構可以理解，在这种电机里，变动的电路耦合，是靠变动电路的相对位置而获得的。在这个总称之下，它们在控制系统中，还分别称为整步发电机、整步控制变压器、参差整步变压器、整步电动机或参差整步电动机。此外，整步发电机也称为整步发訊机，其他的也统称为整步收訊机。应该指出，它们虽然具有变压器、电动机或发电机之类的名称，但从它们的功用和运行原理看来，它们并没有这些普通名詞定义所规定的那些涵义。我们沿用这些名称只是从俗，不必依严格的邏輯去追求名实相符。

将来可以看到(2-5、2-10 和 2-11 节)，整步电机是用变换与傳輸位置、速度或轉矩的方式，使得两根轉軸趋于同步的。本章的主要内容，就是討論这种电机。

还有一些功用与此类似的装置，但可以单独完成整步任务；而且是借变更磁路的結構而获得电路耦合的变动。在 2-2 和 2-3 节中論述的山字形变压器和袖珍同步机即属于这类。它们虽然用得不多，但关于它们的理論，可以作为探討整步电机理論的初阶，因而附贅于这一章，并首先討論它們。

在 2-12 节中所討論的回旋变压器或三角分析器，是常見于电子計算机中的一个元件。它的結構和运行原理同整步电机类似，所以也附贅于这一章。

在表 2-1 中，记录了一些关于整步电机的产品数据。这些資料系从参考文献 1 和 2 中节录来的，从那些数字可以了解整步电机的功率水平和物理形态。已經说过，它们是成对使用的，为了显示它们的配合，在表 2-2 中，列出了某一型号发訊机应接收訊机的型号及可接的最多数目。

表 2-1 整步电机产品(苏联)的规格及尺寸

產品型號	運行情況	額定數據				尺寸(毫米)				重量 (公斤)	轉動慣量 (克·厘米·秒 ²)
		勵磁 電壓 (伏)	頻率 (赫)	最大 功率 (瓦)	副邊最 大電壓 (伏)	外徑	長		軸徑		
							連軸	不連軸			
ДН-153	發訊機	110	500	3.3	47	42	—	67	3	0.028	
ДН-194	發訊機	110	50	13	50	67	119	91	4	0.11	
ДН-414	發訊機	110	50	20	57	67	149	121	4	—	
ДН-423	發訊機	110	500	20	47	62	—	121	4	0.170	
ДН-425	發訊機	55	50	18	55	67	149	121	4	0.170	
ДН-434	發訊機	220	500	11	60	62	—	91	4	—	
ДН-500	發訊機	110	50	17	55	110	150	121	5	2.0	
ДН-501	發訊機	110	50	15	55	110	150	121	5	1.3	
ДС-500	發電機	110	50	16	55	110	160	140	8	0.74	
СС-153	電動機	110	500	2.2	47	42	—	53	3	0.016	
СС-404	電動機	110	50	13	50	67	119	91	4	0.11	
СС-405	變壓或電動機	110	50	7.5	51	67	119	91	4	0.10	
СС-410	電動機	55	50	13	50	67	119	91	4	0.11	
СС-500	電動機	110	50	16	55	110	85	72	4	0.74	
СС-501	電動機	110	50	13	55	110	150	121	5	1.2	
ЭД-101	變壓器	50	50	6.5	39	67	119	91	4	0.11	
ЭД-501	變壓器	57	50	8.5	50	110	150	121	5	0.2	

表 2-2 表 2-1 所列整步电机配合表

可接收訊机最大数目 發訊机型号	CC-153	CC-404	CC-405	CC-410	CC-500	CC-501	AC-500	ЭД-101	ЭД-501
ДН-153	1	—	—	—	—	—	—	—	—
ДН-423	12	—	—	—	—	—	—	—	—
ДН-454	—	—	—	4	—	—	—	—	—
ДН-404	—	3	—	—	—	—	—	1	—
ДН-414	—	6	6	—	—	—	—	—	—
ДН-425	—	—	—	4	—	—	—	—	—
ДН-500	—	—	—	—	8	8	8	—	—
ДН-501	—	8	8	—	4	4	4	2	2

2-2 山字形变压器

山字形变压器是一种依靠磁耦合把两个机件的相对位移变为电压信号的最简单的机械。照图 2-1 所示,它是由两个用电工鋼片迭成的磁性结构所组成:一个结构制成山字形,山字的三条腿上都繞着螺管形綫圈;另一个结构則制成一字形,裝在前一結構的前面,充当磁通的跳板。在运行时,山字的中间一条腿上的綫圈接到交流的供电綫上,在左右两条腿上的两个綫圈里将分别感应电压 v_1 和 v_2 。

綫路的接法使得这两个电压相减,它们的矢量差就是这台变压器的输出。左右两个綫圈有完全相同的特性,如果一字形的結構放在它的中心位置,因为左右两股磁通所遭遇的磁阻相等,这两个綫圈中感应的

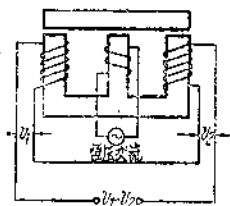


图 2-1 山字形变压器

电压相等，变压器的输出为零。当一字形结构的位置有些偏倚时，左右两个磁路的磁阻不同，磁阻最小的将有更多的磁通，在对应的线圈中感应更大的电压。例如，如果一字形结构从图示的位置向左移动一些，由于左边磁路的磁阻小些， v_1 应该比 v_2 大，变压器的输出电压 $v_1 - v_2$ 会有某一数值和某一极性。反之，如果这个一字形结构向右移动相等的距离， v_1 将比 v_2 小，电压之差 $v_1 - v_2$ 将同第一个情况的相等，但极性相反。

照这样看来，这种变压器的输出电压可以同一字形结构离开它的中心位置的距离大致成正比，而它的极性指示这个位移的方向。这种装置显然可以用来测量两个机件间的位移。在实际的用途里，那个充当磁通跳板的结构也可以做得对变压器旋转。如果这两个可以相对运动的结构分别连到控制和被控制转轴，而变压器的输出又用来鼓动被控制机械，我们就获得误差检测器了。

在船用回旋罗经中，可以看到使用山字形变压器的例子。在这个用途里，变压器的山字形结构缚在一个用回旋器定位、并且能够在水平面旋转 360° 的大环上；而一字形结构则装在另一个环上，这个环在山字形变压器同一平面上移动，并通过齿轮同伺服电动机耦合。对伺服电动机供电的放大机则接到变压器的输出端点。这个器械的最初安置是一字形结构正对着山字形结构。这显然是闭环式的自动控制系统，而山字形变压器充当了误差检测器。在运行时，伺服电动机将驱动第二个环，直到这个误差检测器的输出电压等于零为止。这意味着，一字形结构必然追随着山字形结构而运动，也就是在第二个环上将重现第一个大环的位置，以测出回旋罗经所指示的方向。同回旋罗经相比，第二个环能够发挥更大的力，其他需要依照航行方向旋转的器械可以缚在第二个环上，让它们追随