

316009

高等學校試用教材

磁羅經自差學

許旺善 編著

人民交通出版社



38980

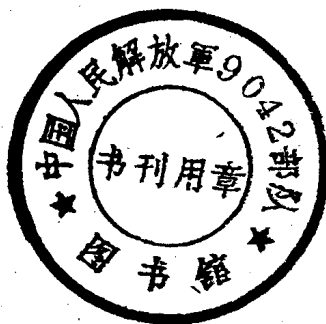
~~316009~~

高等學校試用教材

磁羅經自差學

(海洋船舶駕駛專業用)

許旺善 編著



人民交通出版社

高等学校試用教材
磁 罗 經 自 差 学
許 旺 善 編 著

*

人 民 交 通 出 版 社 出 版

(北京安定門外和平里)

北京市書刊出版业營業許可証出字第〇〇六号

新华书店北京发行所发行 全国新华书店經售

人 民 交 通 出 版 社 印 刷 厂 印 刷

*

1982年7月北京第一版 1982年7月北京第一次印刷

开本: 850×1168₃₂ 印張: 7-8張插頁5

全書: 190,000字 印数: 1—1,050册

統一書号: 15044·5279

定价(10): 1.40元

目 录

結 論.....	4
第一章 磁和地磁的基础知識.....	9
§ 1、磁力、磁場及磁場强度、磁力綫.....	9
§ 2 由磁鉄所生的磁場强度.....	12
§ 3 地磁場.....	15
§ 4 地磁水平强度 H 对磁針的作用.....	17
§ 5 磁鉄和磁針位于同一水平面时磁鉄磁場和 地磁場对磁針的作用.....	17
§ 6 磁鉄在地磁場中的摆动周期.....	23
§ 7 地磁場水平强度 H 的測定与比較.....	24
§ 8 磁矩的測定.....	25
§ 9 磁感应、磁性材料和地磁感应.....	26
第二章 航海磁罗經.....	30
§ 1 船用磁罗經的分类.....	31
§ 2 液体磁罗經的結構.....	31
§ 3 干罗經的結構.....	37
§ 4 方位仪.....	38
§ 5 哑罗經.....	42
§ 6 船上罗經的安装.....	44
§ 7 船上罗經的保管.....	47
§ 8 救生艇用磁罗經.....	48
第三章 自差測定.....	49
§ 1 自差測定的方法.....	49
§ 2 利用天体時間方位測定自差法.....	49
§ 3 利用航向或方位比對測定自差法.....	53

§ 4	利用陆标方位测定自差法	57
§ 5	磁罗经自差测定记录簿	59
第四章	船平正时的自差理论	61
§ 1	作用于船上罗经的磁力	61
§ 2	作用力坐标轴的选定	62
§ 3	地磁力对罗经的作用	63
§ 4	永久船磁力对罗经的作用	63
§ 5	感应船磁对罗经的作用	71
§ 6	所有磁力对船上罗经作用的归纳	96
§ 7	λ 值测定	101
§ 8	作用于罗经上的各力所产生的最大自差值 最大自差航向和最小自差航向	106
§ 9	船平正时自差基本公式的推导	115
§ 10	五个近似自差系数求法	116
§ 11	近似系数与真系数的关系	125
第五章	船倾斜时自差的变化（即倾斜自差理论）	130
§ 1	船横倾时的倾斜自差	130
§ 2	船纵倾时的倾斜自差	139
§ 3	纵倾系数与横倾系数比较	140
第六章	自差消除	140
§ 1	自差消除前的准备和检查工作	141
§ 2	自差消除程序	144
§ 3	象限自差消除法	146
§ 4	次半圆自差消除法	156
§ 5	倾斜自差消除法	164
§ 6	主半圆自差消除法	169
§ 7	自差消除综合步骤	180
§ 8	总结	181
第七章	剩余自差测定和航行自差表计算	184
§ 1	有关自差表计算的一些说明	184

§ 2	自差表計算程序	185
§ 3	訥比尔航向換算圖	191
第八章	自差变化	192
§ 1	由船磁緯区的变化而引起的自差变化	193
§ 2	由于其他原因而引起的自差变化	197
第九章	电磁自差	198
§ 1	磁性水雷爆炸与船磁关系	198
§ 2	船磁場的分析	199
§ 3	船磁消磁的原理	200
§ 4	如何检查由船磁所产生的垂直磁場 是否已正确地消除	204
§ 5	消磁綫圈对罗經自差的影响(即电磁自差 产生的原因)	204
§ 6	电磁自差的消除法	207
§ 7	剩余电磁自差測定	210
§ 8	消磁綫圈和电磁补偿綫圈的电路原理	210
附編	应用偏轉仪消除自差法	212
§ 1	科郎格偏轉仪	212
§ 2	湯姆逊偏轉仪	227
§ 3	用偏轉仪消除半圓自差力法	230
§ 4	用科郎格偏轉仪消除傾斜自差力法	236
附表	1. 引数 X 与每隔 15° 航向正弦的乘积表	237
	2. 自差內插比例表	242
	3. 自差內插圖	242
	4. 磁罗經自差形成和消除摘要表	插頁

緒 論

磁羅經自差學是研究船上磁羅經誤差產生的原因及其消除方法的一門科學。

船舶從一個港口安全又經濟地航行到另一個港口，完成運輸任務，需要依靠羅經來指示方向，所以我們稱羅經是“船舶的眼睛”。

船上磁羅經是有誤差的，這個誤差會直接影響到航行的安全。為了確保航行安全，船舶駕駛員必須了解自差產生的原因，並掌握自差消除的方法。

羅經早期稱“司南”；中期稱“指南針”、“地螺”；晚期稱“針盤”、“子午盤”、“羅盤”、“羅鏡”、“羅星”、“羅盤針”等等。

羅經是我們祖先的伟大發明之一，早在兩千多年以前，中國人就知道利用物理學上所說的磁石的指極性，發明了利用天然磁石的這一特性而製造的儀器。它的發明，不論在交通史上，文化史上都占着非常重要的地位。

遠在二千三百年前的戰國時代，我國人就知道了磁石的性質，古書“呂氏春秋”里面就記載有：“磁石召鉄或引之也”的話（“呂氏春秋”完成於戰國末期）。從相當於這個時期的古書“韓非子”中也見到了“司南”的名稱。司南形狀如湯匙（勺形）。到宋代又出現了人造磁體的指南魚。這些記載見於“武經總要”和“夢溪筆談”。“武經總要”是宋代的軍事學大全。由此可見，那時已將指南的儀器用到行軍上去了。至於指南針在航海上的應用方面，北宋末年朱彥著的“萍洲可談”一書中有如下的記載：

“舟師識地理，夜則觀星，晝則觀日，陰晦觀指南針”。

这几句话是世界上关于航海上使用指南针的最古的记录了。

“萍洲可谈”一书是在1119年著的，书中有关广州方面的記事，都是根据朱彧的父亲朱服在广州时耳聞目睹的事写成的。朱服在广州是在1099~1102年。由此可見，在十一世紀时，指南針在我国航海事业上已普遍使用了。

我国在宋、元两朝，航海事业非常发达，海上交通已极繁荣，当时我国的大商船队在南海和印度洋上非常活跃，并到过波斯湾与阿拉伯人进行貿易，甚至更远的航行到非洲东部沿岸岛屿。这种远航，如果没有准确的指南針来指示航路，是难以实现的。

随着我国航海事业的发展，宋代就有大船航行到波斯湾。后来又由阿拉伯人把罗經传到欧洲去，恩格斯著的“自然辯証法”一書中，曾說到磁針是1180年左右从阿拉伯传到欧洲去的（“自然辯証法”。人民出版社1959年版，第157頁）。欧洲文献中，有关罗經的記事是在十二世紀末和十三世紀初，在这以前，便找不到有关罗經的記載了。

在早期时所制勺形的司南，其准确度是不高的，经过实用后，逐渐改进，每經一次改进，它的准确度也就跟着提高，从“梦溪笔談”記載中知道，我国在十一世紀中的指南針的磁性体已进步为針状，和現在的磁針的形状极为接近。“梦溪笔談”中記載当时支挂指南針的方法有四种：（1）把磁針搁置在手指甲上；（2）把磁針搁置在碗边上；（3）将磁針横插在灯心草，浮在水面上；（4）以独股的絲用蜡少許黏于針腰，于无风处悬挂起来。該書中还叙述了前三种的缺点，并指出第四种为最善的。的确，这种以独股絲悬挂的方法是很科学的，其准确度是很高的。由于当时提高了指南針的准确度，因而发现了指南針在地面上所指的方向并非正南，它与正南成一偏角（这偏角即今天所称的磁差），这是地磁学上一个非常重要的发现。从史料中攷証，首先記載磁針偏角現象見于沈括著的“梦溪笔談”一書中。書中記載指南針不指向正南方，而稍微偏东，亦即它的北极不指正北而稍

偏西，這就是現在所說的西磁差。“夢溪筆談”里對磁差的大小沒有數字的記載。到了明代，我們的祖先不但能夠精確地測定磁差的大小，並且還知道磁差的大小是隨着地點的不同而變異。卡約黎著的“物理學史”和弓場重泰著的“物理學史”都有這樣的記載：磁針不指正南北方向。中國早在十一世紀就已知曉，而西洋相傳哥倫布在1492年橫渡大西洋時，才發現了磁針的磁差，要比沈括的記載晚了四百餘年。

磁羅經的製造由簡單到複雜，由不甚合用到合用，尤其是最近幾年來有了飛躍的發展。例如利用磁羅經帶復示器、利用磁羅經裝置自動操舵等。

裝在船上的磁羅經，由於船上鐵材部分所產生的磁場影響，失去了原有的準確性，發生了表面上看來似乎不規則的誤差。這種誤差，現在稱它為自差。有關自差的產生和克服問題，我們祖先很早就提出了。例如明末方以智著的“物理小識”曾說到鐵對磁針的干擾，以及海船不用鐵釘的原因是由於“海咸爛鐵，且妨磁也”。首先在船上進行自差測定的是有名的俄國航海家依·弗·克魯茲尼捷爾，他在1815年曾作過羅經自差觀測。過去我們對自差未有認識，把它看做一種神秘而不可解說的现象。後來由實踐中逐漸地總結出產生自差的原因，並認識到表面上看來似乎不規則的自差，却有它自己形成與發展的規律，同時又了解到這種自差不是靜止不變的，而是時刻在變化着的。自差往往由小變到大，或由大變到小，不但數值上起變化，而且時常會由東自差變到西自差，或由西自差變到東自差。這些變化絕不是偶然發生的，而是依着一定的條件、地點與時間，起着有規律的變化。例如船在港內停泊了相當長的時間後，所求出的新自差就與原來所求的自差不同，不但數值上有所不同，有時自差的性質也起了變化。如果將船換一個方向停泊，其變化結果又不同，這些變化的情況又與停泊的時間長短有關。即使船在某一固定方向停泊的時間不長，自差也是有變化的，不過變化的量不大，一時還觀測不出來，時間一久，由許多不明顯的逐漸的變化積累起來，就會有

显著的变化。就是同一时间、同一地点、同一航向，船向左舷倾斜与向右舷倾斜所求得的自差也是不同的。即使是同一方向倾斜，倾斜角度不同，自差值也不同。船由高纬度向低纬度航行，或由低纬度向高纬度航行，自差值也会跟着起变化。这种自差变化的现象，是与它的周围环境有着密切不可分的关系。

自差被发现后，可以设法予以消除，但消除后，又会慢慢地有新的自差产生。当新的自差增长到一定值后，又得做新的自差消除工作。

自差的存在如不及时测定，予以合理的消除，会影响船舶航行的安全。故从事船舶驾驶的人们，必须对磁罗经自差有充分的认识，才能确保航行的安全。

在十九世纪初，各国学者与海员们就开始了研究自差的现象。法国的物理学家泊松发表了对罗经影响力的恒等式。英国天文学家爱利提出关于半圆自差消除法，佛林德尔船长提出关于用垂直软铁消除半圆自差法。俄国的依·培·别拉维奇于1862年为了要使自差减少，使用了独创而又简单的近似自差消除法：当船下水后，他将船朝向与原来造船时所朝相反的方向停靠，然后进行其他的装备，由于这样措施的结果，罗经自差由 46° 减到了 16° 。别拉维奇逝世后，由他的助手科郎格来领导俄国磁罗经事业的发展，科郎格在有关自差方面写了三十多种著作，他研究了半圆自差、象限自差和倾斜自差等一系列的消除法，并设计了测量地磁水平和垂直分力的磁力计，科郎格所发明的消除自差仪器和自差消除方法，至今还被人应用着。在科郎格的领导下，克雷洛夫进行研究罗经磁针排列的问题，对磁针系统的排列加以数学上的分析。根据他的理论来排列磁针，可以同时消除六倍和十倍自差，以及八倍自差和十二倍自差的可能性。德毛卡洛夫后来又把磁针系统的各种排列作深入的研究，证明磁针的排列只有在磁针与刻度盘 $0\sim 180^\circ$ 方向平行，其等磁极在同一圆周上时才是最适当的。不但如此，他还解决了可以消除到十四倍，高级自差的条件下排列三对磁针的方程，这样就可使罗经自差消除得更为完善。

罗經是我国最早发明的，但是由于长期以来的封建压迫，加上近百年来帝国主义的侵略和国民党的反动統治，使我国在罗經的发展方面也和其它近代科学一样停滞不前，远远落后于其它科学上先进的国家。自中华人民共和国成立以来，由于党对科学技术事业的重视和正确的领导，我国科学技术事业随着整个国民经济的大跃进，得到了迅速的发展。我国培养了一批新的磁罗經校正师，新培养出来的船舶駕駛員，也都掌握了消除磁罗經自差的理論和技能。这样，就完全摆脱了解放前长期依靠外国人来进行磁罗經自差消除工作的状况。在磁罗經自差理論方面，由于一方面繼承了祖国的遗产，学习了苏联和国外的先进科学技术，另一方面不断地吸取了我国的科学技术的新成就，因此理論水平也有了很大的提高。

第一章 磁和地磁的基础知識

在研究磁罗經自差前，首先要复習一下磁的基本特性和地磁的情况，因为这些都是研究磁罗經自差时不可缺少的基础知識。

§ 1 磁力、磁場及磁場强度、磁力綫

在說明磁力和磁場强度等之前，先把有关的几个基本名詞复習一下。

1. 磁极——磁鉄的磁性最强的地方，称**磁极**，其位置在磁鉄的内部而在距端点約为全长 $L/12$ 处。每条磁鉄均有两个磁极，若将磁鉄用綫把它悬挂起来，它必定靜止在南北方向。当它靜止时，指地球北极的一端称**北极**（ N ），指南的一端称**南极**（ S ）。在磁罗經自差中，常常以紅色表示北极，藍色表示南极。磁极具有同性相拒、异性相吸的特性。

2. 磁軸——磁鉄中两极的連接綫称**磁軸**，其方向为自南向北的。

3. 磁量和磁矩——为了表示磁极的强度，用磁量（ m ）来表示，磁鉄两极的磁量是相等的。磁鉄的磁量

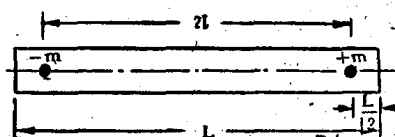


图 1-1

（ m ）与两极間距离（ $2l$ ）的乘积称为**磁矩**（ M ），即 $M=2lm$ 。

一、磁 力

两磁极間产生相拒或相吸的作用力，叫做**磁力**。

两磁极間作用的磁力与两磁极所含的磁量相乘积成正比，与其距离的平方成反比，这个定律系庫侖（1736~1806年）所发现的，故称为庫侖定律。又两极間的磁力随居間介質的种类而异，故磁力可以下式表示：

$$F = c \frac{m_1 m_2}{d^2} \quad (1-1)$$

式中： m_1 和 m_2 ——两极所含的磁量；

d ——两极間的距离；

c ——比例常数；

F ——磁力。

比例常数 c 的大小，視所采用的单位和两极間的介質而定。

若以 $\frac{k}{\mu}$ 表 c ，則上式可写成如下的形式：

$$F = \frac{k}{\mu} \cdot \frac{m_1 m_2}{d^2} \quad (1-2)$$

式中： k ——由所采用的单位而定的系数；

μ ——視两极間的介質而定的系数，称磁导率。在真空中 $\mu = 1$ ，对于在空气中的 μ 也接近于 1。

F 与 d 的单位可采用厘米，克，秒（C.G.S.）制，即 F 以达因計， d 以厘米計。 μ 在真空中等于 1，这样 m_1 和 m_2 两磁量的单位可从各量所采用的单位来决定。如果在真空中置相等的两磁量，令其相距 1 厘米，然后調整这相等两磁量的大小，令其所产生的力适为 1 达因时为止，这时 k 应等于 1，而两磁量也各为一个单位，这个磁量单位叫做电磁系（C.G.S.M.）磁量单位。这样就使庫侖定律具有最简单的形式：

$$F = \frac{m_1 m_2}{d^2} \quad (1-3)$$

此公式中虽規定磁极須在真空中，然而即使磁极在空气中，引用此公式計算，誤差亦极小，故在一般問題中，不論磁极在真空中或空气中，此公式均可适用。

二、磁場和磁場強度

磁鐵能對周圍的磁體產生力的作用，例如它能吸引鐵制的物品，能使磁針轉動，凡具有此種磁力作用的空間就叫做磁場。

為了比較磁場的強弱，可以磁場強度來表示。所謂磁場強度者，就是在磁場內某點置一單位正磁量所受到的磁力，即該點的磁場強度，通常以 H 來表示磁場強度。設有 m 磁量的磁極在磁場內某一點所受到的磁力為 F ，則該點的磁場強度 H 為：

$$H = \frac{F}{m} \quad (1-4)$$

令 $m = +1$ 代入上式，得：

$$H = F \quad (1-5)$$

即磁場強度可用作用於單位正磁量的力來表示。

在電磁系中，磁場強度的單位叫做奧斯特。某點磁場強度為 1 奧斯特時，就是說單位電磁系正磁量在那一點所受的磁力為 1 達因。

磁場強度 H 系一向量，故將兩個磁場強度相加時，必須用向量相加法則。若在某範圍內 H 之值相等，方向又是平行，則在此區域內之磁場稱均勻磁場。

在較簡單的問題中，磁場中各點的強度 H 計算頗易。計算方法先假定置一單位正磁量於該點，求此單位正磁量所受之力。例如在含有 m' 磁量的磁場內， p 點置一單位正磁量， p 點與 m' 間的距离為 d 厘米，那麼在方程 $F = \frac{m_1 m_2}{d^2}$ 中，令 $m_1 = 1, m_2 = m'$ ，

即可求得 p 點的單位磁量所受的力為 $\frac{m'}{d^2}$ ，亦即得 p 點的磁場強度：

$$H_p (\text{奧斯特}) = \frac{m' (\text{電磁系磁量單位})}{d^2 (\text{厘米})} \quad (1-6)$$

三、磁 力 綫

依照磁場中各点磁場强度的方向，順連而成的曲綫或直綫，叫做**磁力綫**。換言之，磁力綫者即指示磁場內磁力作用方向的曲綫，曲綫上任意点的切綫，即指示該点的磁力的方向。

§ 2 由磁鉄所生的磁場强度

由一根磁鉄所生的磁場强度，随位置不同而异，現在就下列三种情况来进行研究。

一、求在磁軸延長綫上 P_1 点的磁場强度

如图1-2所示，設磁鉄 SN 的长度为 $2l$ 厘米，今欲求在磁軸

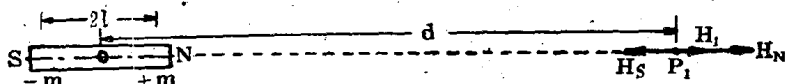


图 1-2

延長綫上 P_1 点的磁場强度， P_1 点与磁鉄中心 O 的距离为 d 厘米，若磁鉄两端所含的磁量各为 $+m$ 和 $-m$ ， P_1 点的磁場强度由下列两部分的磁場强度所組成，即：

$$\text{一部分由 } N \text{ 极的 } +m \text{ 磁量所产生的，其量为 } \frac{m}{(d-l)^2} \quad (\text{a})$$

$$\text{一部分由 } S \text{ 极的 } -m \text{ 磁量所产生的，其量为 } \frac{-m}{(d+l)^2} \quad (\text{b})$$

(b) 式中的負号是表示磁場方向与 (a) 式相反， P_1 点的磁場强度应为 (a) 式与 (b) 式的向量和。設 P_1 点的磁場强度为 H_1 ，則：

$$\begin{aligned} H_1 &= \frac{m}{(d-l)^2} - \frac{m}{(d+l)^2} \\ &= \frac{4mld}{(d^2-l^2)^2} = \frac{4mld}{d^4 \left(1 - \frac{l^2}{d^2}\right)^2} \end{aligned}$$

以 $M = 2ml$ 代入，則上式可写成：

$$H_1 = \frac{2M}{d^3} \left(1 - \frac{l^2}{d^2} \right)^{-2}$$

$$= \frac{2M}{d^3} \left(1 + 2 \frac{l^2}{d^2} + 3 \frac{l^4}{d^4} + 4 \frac{l^6}{d^6} + \dots \right) \quad (1-7)$$

$\frac{l}{d}$ 恒小于 1，在一般情况下取展开式的首两项已够，即：

$$H_1 = \frac{2M}{d^3} \left(1 + \frac{2l^2}{d^2} \right) \quad (1-8)$$

如当磁铁半长 l 与距离 d 相比甚小时， $\frac{2l^2}{d^2}$ 项也可略去不计，得一般的常用近似公式：

$$H_1 = \frac{2M}{d^3} \quad (1-9)$$

式中， H_1 的单位为奥斯特， M 的单位为 C.G.S.M. 磁矩单位， d 的单位为厘米。

二、求在磁轴中心垂直线上 P_2 点的磁场强度

設仍用前面所用的磁铁 SN ，但 P_2 点位于 SN 中点 O 的垂直线上（图 1-3）， P_2 点至磁铁中心 O 的距离为 d 厘米。由磁量 $(+m)$ 对 P_2 点所产生的磁场强度为 $\frac{m}{d^2 + l^2}$ ，其方向为 P_2B ；由磁量 $(-m)$ 对 P_2 点所产生的磁场强度亦为 $\frac{m}{d^2 + l^2}$ ，其方向为 P_2A ；由磁铁 SN 所产生的磁场强度应为此两磁场强度的向量和，即 P_2C ，其方向与磁铁 SN 平行，且指向于 S 极的方向。設以 H_2 表示 P_2 点的磁

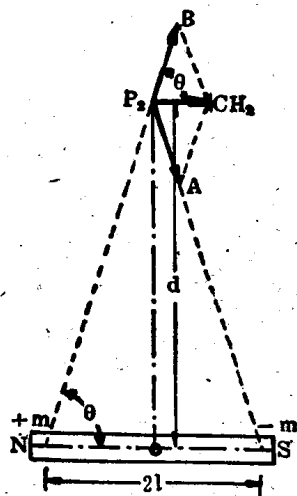


图 1-3

場强度，則：

$$\begin{aligned}
 H_2 &= \frac{2m}{d^2 + l^2} \cos \theta = \frac{2ml}{(d^2 + l^2)^{3/2}} = \frac{M}{(d^2 + l^2)^{3/2}} \\
 &= \frac{M}{d^3 \left(1 + \frac{l^2}{d^2}\right)^{3/2}} = \frac{M}{d^3} \left(1 + \frac{l^2}{d^2}\right)^{-3/2} \\
 &= \frac{M}{d^3} \left(1 - \frac{3l^2}{2d^2} + \frac{15l^4}{8d^4} - \frac{35l^6}{16d^6} + \dots\right) \quad (1-10)
 \end{aligned}$$

若仅取展开式的首两项，則上式可写成：

$$H_2 = \frac{M}{d^3} \left(1 - \frac{3l^2}{2d^2}\right) \quad (1-11)$$

当 $\frac{l}{d}$ 值甚小时， $\frac{3l^2}{2d^2}$ 項也可略去不計，得一般采用的近似公式：

$$H_2 = \frac{M}{d^3} \quad (1-12)$$

比較 (1-9) 与 (1-12) 两式，可知 H_2 仅为 H_1 的一半，这一点应特別加以注意。

三、求任意一点的磁場强度

設仍用前面所述磁矩为 M 的磁鉄 SN ，其磁矩为 M ，它对 P_3 点所发生的磁場强度可作如下的分析：即把 SN 所产生的磁場看作由 $S'N'$ 和 $S''N''$ 互相垂直的两磁場的合磁場，并使 $S'N'$ 方向与 OP_3 方向一致。这样，在 P_3 点由于 SN 所产生的磁場，就同由 $S'N'$ 和 $S''N''$ 所产生的磁場一样。設 M' 为 $S'N'$ 的磁矩， M'' 为 $S''N''$ 的磁矩，則 M' 和 M'' 同 M 有如下的关系：

$$M' = M \cos \beta$$

$$M'' = M \sin \beta$$

$S'N'$ 对 P_3 点所产生的磁場强度为 $\frac{2M \cos \beta}{d^3}$ 。