

磁流体发电中洛伦兹力的作用

徐蓓蓓

(上海市嘉定区教育学院教学研究处, 上海 201800)

摘要 为厘清磁流体发电中洛伦兹力的作用及发电机理, 解决学生对“非静电力做功与能量转化”的认知困惑, 本文结合高中物理课程标准及教材, 运用电荷在磁场中受到的洛伦兹力分析磁流体发电的机理, 应用广义欧姆定律计算磁流体发电的输出电压。结果表明: 洛伦兹力不直接参与能量转化, 仅改变电荷动量使正、负电荷分离; 静电力做负功将等离子体部分动能转化为电能; 电动势表达式为 $\varepsilon = Bdv$ (B 为磁感应强度, v 为等离子体速度, d 为极板间距), 输出电压与多种因素相关。本文讨论表明, 电动势的建立既可源于外力做功, 也可直接源于内能。

关键词 磁流体发电; 洛伦兹力; 电动势; 能量转化

DOI: 10.27024/j.wlygc.2025.08.22.01

THE ROLE OF THE LORENTZ FORCE IN MAGNETOHYDRODYNAMIC POWER GENERATION

XU Beibei

(Department of Teaching and Research, Jiading District Institute of Education, Shanghai 201800)

Abstract To clarify the role of the Lorentz force and the mechanism of magnetohydrodynamic (MHD) power generation, and to address students' misconceptions regarding nonelectrostatic force work and energy conversion, this paper analyzes the power-generation process of MHD generators on the basis of high school physics curriculum standards and textbooks. The role of the Lorentz force acting on charged particles in a magnetic field is examined, and the output voltage is derived using the generalized Ohm's law. The results show that the Lorentz force does not directly participate in energy conversion; rather, it only causes the separation of positive and negative charges by changing their direction of motion. The electrostatic force does negative work, thereby converting part of the kinetic energy of the plasma into electrical energy. The electromotive force is given by $\varepsilon = Bdv$ (where B is the magnetic flux density, v is the plasma velocity, and d is the distance between the plates), and the output voltage depends on multiple factors. The analysis further indicates that electromotive force may originate either from work done by external forces or directly from internal energy.

Key words magnetohydrodynamic power generation; Lorentz force; electromotive force; energy conversion

收稿日期: 2025-08-22; 修回日期: 2026-02-06; 出版日期: 2026-03-30

通信作者: 徐蓓蓓, xbb0012@163.com。

引文格式: 徐蓓蓓. 磁流体发电中洛伦兹力的作用[J]. 物理与工程, 2026, 36(2): 276-279.

Cite this article: XU B B. The role of the Lorentz force in magnetohydrodynamic power generation[J]. Physics and Engineering, 2026, 36(2): 276-279. (in Chinese)

《普通高中物理课程标准(2017年版2020年修订)》中关于“磁场”主题的要求包括“了解带电粒子在匀强磁场中的偏转及其应用^[1]”。磁流体发电作为一种新型电源,不仅对电力工业的发展有积极意义,而且由于其发电机理涉及磁场对运动电荷的作用,成为高中物理教学中洛伦兹力应用的典型例证。不少现行的高中物理教材(教科书、教学参考资料或练习册等)都包含有磁流体发电机的内容^[2-5]。近几年各地模拟卷中也经常出现“磁流体发电”的相关问题,受到广大师生的重视。

在磁流体发电的教学中,必然涉及电动势的起源。不少学生根据习惯认知——电动势的产生是由于在电源内部非静电力将正电荷从电源负极向正极输送过程中做功而将其他形式的能量转化为电势能,认为这里的非静电力就是洛伦兹力。但洛伦兹力并不做功,这就提出了磁流体发电过程中“洛伦兹力到底起什么作用”和“发电机理究竟为何”的问题。本文即对这两个问题进行分析讨论。

1 磁流体发电的物理过程

就中学教学而言,关于电源电动势的传统理解可概括为以下三点:(1)电动势是反映电源将其他形式的能量转化成电能(即电极上积累的电荷的电势能)本领的物理量。(2)电动势产生的机理是在电源内部非静电力将正电荷从负极向正极(或将负电荷从正极向负极)输送过程中克服电场力做功。(3)电动势在数值上等于在电源内部非静电力将单位正电荷从负极(低电势能区)向正极(高电势能区)输运,或将单位负电荷从正极向负极输送所做的功,也等于电源空载时的路端电压。接下来,本文将探讨磁流体发电产生电能的过程是否与上述理解相吻合。

图1(a)为磁流体发电机的示意图。有一矩形管道(称为发电通道)沿 x 方向置于匀强磁场中,磁场沿 y 方向,管道的上、下两个面分别为金属电极a、b。高温等离子体^[3]从左方沿 x 正方向高速喷入发电通道,在磁场 $\mathbf{B}$ 的洛伦兹力的作用下,等离子体中的正电荷受洛伦兹力 f_+ 的作用而向上运动并在a面积累,使之成为电源的正极;同理,负电荷则受洛伦兹力 f_- 的作用向下运动,并在b

面积累,使之成为电源的负极,如图1(b)所示。已经积累在电极上的电荷会产生沿 $-z$ 方向的静电场,后续电荷在电极上继续积累时必须克服该电场力做功,将自身的部分动能转化为电势能,即静电场的电场能^[6],下文简称电能。

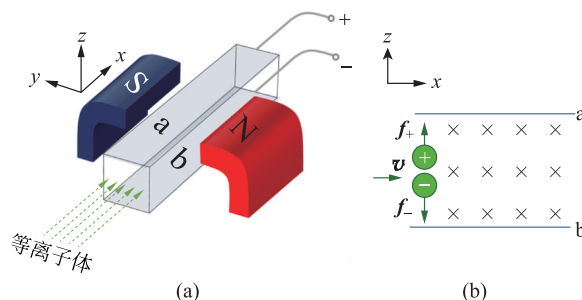


图1 磁流体发电机示意图

(a) 整体结构示意图; (b) 平面示意图

如果在两极间外接负载,就有电流通过并输出电能。从上述磁流体发电机理可以看出,发电机内部并无正电荷从负极(正电荷的低电势能区)向正极(正电荷的高电势能区)迁移,也无负电荷从正极(负电荷的低电势能区)向负极(负电荷的高电势能区)迁移;只有从外部喷入的等离子体内的正、负电荷彼此分离,各自向正、负电极运动并在其上积累。值得注意的是,在电荷积累过程中并无任何非静电力做功导致其他形式的能量转化成电能,反而是正、负电荷由于电极的电场力做负功而将自身的部分动能转化为电能。因此,磁流体的发电过程或电动势形成的能量转化机理和传统对电动势的理解有一定的差别。换言之,磁流体发电进一步丰富了中学物理教学领域对电动势形成机理的本质性认知。

从上述讨论可以看出,虽然洛伦兹力是非静电力,但由于其不做功而并非传统对电动势认知中做功的非静电力。然而,洛伦兹力仍然是磁流体发电不可或缺物理因素。洛伦兹力尽管因为不做功而对能量转化没有贡献,却起着改变电荷动量的重要作用。在洛伦兹力作用下,沿 x 方向运动的电荷转向 z 方向,使 x 方向的动量转移至 z 方向,从而等离子体中的正、负电荷才得以彼此分离,并沿电场各自向正、负极运动。进而,由于电场力做负功,部分动能转化为电能。

磁流体发电过程中,洛伦兹力的作用可用电场中绝缘弧形管道内的带电小球的运动做类比。

如图2所示,一个内部光滑的弧形绝缘管子MN被放置在与管道平面平行的电场 E 中。设一带正电荷的小球从底部低电势能区以一定的速率进入管道后向上滑行。小球在底部具有一定的动能,当它向上滑行时管道对小球支持力 F_N 并不做功,但确实小球的速度方向即动量方向不断改变。这类似于电荷在磁场中的偏转现象,支持力 F_N 类似于洛伦兹力。在此过程中,带电小球的动能减小,电势能增加。带正电的小球在静电场的作用下,实现动能和电势能之间的转化。

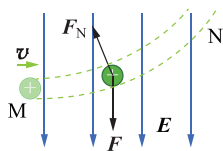


图2 电场中绝缘管道内带电小球的运动

2 电动势的计算

有趣的是,虽然洛伦兹力与产生电动势的能量转化机制无关,却可据以计算电动势的大小。电动势等于电源空载时的路端电压。

磁流体发电机空载情况下(相当于负载断路),等离子体中的正、负离子所受电极间电场的静电力 F 和磁场的洛伦兹力 f 相平衡,离子做匀速直线运动,不再向侧向偏转,如图3所示。

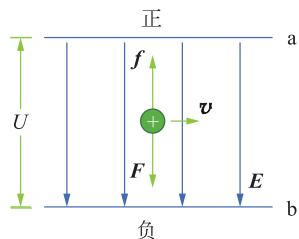


图3 受力示意图

设正离子电荷量为 q ,此时有

$$qvB = Eq \quad (1)$$

其中 v 、 B 、 E 分别为电荷运动速率、磁感应强度和电场强度。若两极间距离为 d ,由电场强度与电势差 U 的关系可知

$$E = \frac{U}{d} \quad (2)$$

U 等于磁流体发电机的电动势 ϵ 。由式(1)和式(2)可得电动势大小为

$$\epsilon = Bdv \quad (3)$$

式(3)表明,电动势 ϵ 与磁感应强度大小 B 、等离子体速度大小 v 和极板间距 d 成正比。可以看出:(1)磁感应强度越大,对带电粒子的洛伦兹力作用越强,更容易使粒子偏转,从而产生更大的电势差;(2)等离子体速度越大,单位时间内通过极板间的电荷量越多,从而电动势也会越大;(3)极板间距越大,在粒子偏转过程中电场力做负功的距离越长,转化成电能的动能越多。

在实际的磁流体发电装置中,通过增大磁感应强度或等离子体速度的大小,可以增大发电机的电动势,从而增加电能的输出。

若将a、b极和负载电阻 R 连接,则有电流通过,如图4所示。设稳态条件下,等离子体在两金属板间均匀分布,电阻率为 ρ 。忽略边缘效应,不计离子的重力及离子间的相互作用,电源输出可如下计算。此时的等效电路图如图5所示。

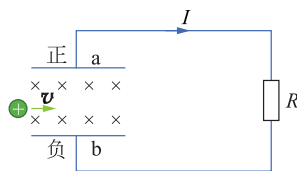


图4 接负载时的电路图

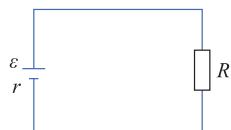


图5 等效电路图

在发电区,由于存在磁场,通常的欧姆定律 $J = \sigma E$ 失效,应该代之以广义欧姆定律

$$J = \sigma(E + v \times B) \quad (4)$$

其中 J 、 σ 、 E 、 v 和 B 分别为电流密度、电导率、电场强度、电荷载流子速度和磁感应强度。

对式(4)两边乘以极板面积 S ,注意电流 $I = JS$,在现在的一维情形可得

$$Ir = Bdv - Ed \quad (5)$$

其中 $r = \rho d / S$ 为电源内阻, $\rho = 1 / \sigma$ 为等离子体的电阻率。

再由 $Ed = U = IR$ 可得

$$I = \frac{\epsilon}{R + r} \quad (6)$$

从而可得磁流体发电机的输出电压,即极板间的电压为

$$U = \frac{BdvRS}{RS + \rho d} \quad (7)$$

输出电压 U 与等离子体的流速 v 、电阻率 ρ 、磁感应强度 B 以及负载电阻 R 等因素密切相关。

3 结语

本文的讨论表明,产生电动势的本质是将其其他形式的能量转化为电能,而这种能量转化既可由外力做功实现(例如化学电池),也可直接来源于内能(例如本文讨论的磁流体发电)。

根据课程标准和教材内容的呈现,磁流体发电的内容只需要“了解”该应用;但这并不妨碍教师根据学生学情进行个性化指导,帮助他们正确理解磁流体发电的本质原理。从提升学科本体知识和学术素养来说,这也有助于教师加深和拓展对电动势概念的理解,更准确地掌握能量转化过程,从而改进相关内容的教学。

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国教育部制订. 普通高中物理课程标准(2017年版 2020年修订)[M]. 北京:人民教育出版社,2020:28
MINISTRY OF EDUCATION OF THE PEOPLE'S REPUBLIC OF CHINA. General high school physics curriculum standards (2017 Edition Revised in 2020)[M]. Beijing: People's Education Press, 2020: 28. (in Chinese)
- [2] 普通高中教科书 物理选择性必修第二册[M]. 北京:人民教育出版社,2020:12.
People's Education Press. General High School Textbook Physics Selective Compulsory Volume II [M]. Beijing: People's Education Press, 2020: 12. (in Chinese)
- [3] 普通高中教科书 物理选择性必修第二册[M]. 北京:教育科学出版社,2021:24.
Education Science Press. General High School Textbook Physics Selective Compulsory Volume II [M]. Beijing: Education Science Press, 2021: 24. (in Chinese)
- [4] 普通高中教科书 物理选择性必修第二册[M]. 上海:上海科技教育出版社,2021:25.
Shanghai Scientific & Technological Education Press. General High School Textbook Physics Selective Compulsory Volume II [M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technological Education Press, 2021: 25. (in Chinese)
- [5] 普通高中物理教学参考资料 选择性必修第二册[M]. 上海:上海科学技术出版社,2023:30-31.
Shanghai Science and Technology Press. General High School Physics Teaching Reference Materials Selective Compulsory Volume II [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2023: 30-31. (in Chinese)
- [6] 冀敏,蒋平. 带电导体体系的电场能量[J]. 物理与工程,2015,25(3):34-37.
JI M, JIANG P. Electric field energy of charged conductor system[J]. Physics and Engineering, 2015, 25(3): 34-37. (in Chinese)
- [7] 潘志民. 高中物理奥林匹克教程[M]. 江苏:江苏人民出版社,2017:194-196.
PAN Z M. High School Physics Olympiad Tutorial [M]. Jiangsu: Jiangsu People's Publishing House, 2017: 194-196. (in Chinese)
- [8] 胡小鹏,高文莉,万春华. 大学物理实验(理科、第一册)[M]. 南京:南京大学出版社,2012:132-135.
HU X P, GAO W L, WAN C H. University physics experiments (Science, Volume 1) [M]. Nanjing: Nanjing University Press, 2012: 132-135. (in Chinese)
- [9] 张三慧. 大学物理学(热学、光学、量子物理)[M]. 第三版. 北京:清华大学出版社,2009:133-134.
ZHANG S H. University physics (Thermal Physics, Optics, Quantum Physics) [M]. 3rd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2009: 133-134. (in Chinese)
- [10] 潘志民. 高中物理奥林匹克教程[M]. 江苏:江苏人民出版社,2017:200-204.
PAN Z M. High School Physics Olympiad Tutorial [M]. Jiangsu: Jiangsu People's Publishing House, 2017: 200-204. (in Chinese)

(上接第 275 页)

People's Education Press, Institute of Curriculum and Textbook Research, Physics Curriculum and Textbook Development Center. Ordinary High School Textbook; Physics (Compulsory 3) [M]. Beijing: People's Education Press, 2020: 114-116. (in Chinese)

[3] 潘志民. 高中物理奥林匹克教程[M]. 江苏:江苏人民出版社,2017:194-196.

PAN Z M. High School Physics Olympiad Tutorial [M]. Jiangsu: Jiangsu People's Publishing House, 2017: 194-196. (in Chinese)

[4] 胡小鹏,高文莉,万春华. 大学物理实验(理科、第一册)[M]. 南京:南京大学出版社,2012:132-135.

HU X P, GAO W L, WAN C H. University physics exper-

iments (Science, Volume 1) [M]. Nanjing: Nanjing University Press, 2012: 132-135. (in Chinese)

[5] 张三慧. 大学物理学(热学、光学、量子物理)[M]. 第三版. 北京:清华大学出版社,2009:133-134.

ZHANG S H. University physics (Thermal Physics, Optics, Quantum Physics) [M]. 3rd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2009: 133-134. (in Chinese)

[6] 潘志民. 高中物理奥林匹克教程[M]. 江苏:江苏人民出版社,2017:200-204.

PAN Z M. High School Physics Olympiad Tutorial [M]. Jiangsu: Jiangsu People's Publishing House, 2017: 200-204. (in Chinese)