

Methods of stabilizing a permanent maglev rotator in heart pumps and other rotary machines

QIAN Kun-xi

Biomedical Engineering Institute of Jiangsu University, Zhenjiang, P.R.China

Received: Sep 26, 2014

Accepted: Oct 10, 2014

Published: Oct 30, 2014

DOI: 10.14725/gjccd.v2n3a831

URL: <http://dx.doi.org/10.14725/gjccd.v2n3a831>

This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract

Permanent maglev rotator in a rotary machine could be stabilized according to the author's experiences, by use of a non-PM (permanent magnetic) force acting together with the PM force, and a non-PM bearing functioning together with the PM bearing, or a so-called gyro-effect which can stabilize all rotators including permanent maglev rotator. This paper presents both axially and radially driven permanent maglev centrifugal heart pumps, as well as a permanent maglev turbine machine and an industrially used permanent maglev centrifugal pump. In all these devices permanent maglev rotators achieve stable equilibrium by different approaches described in detail. Finally, the principle exhibition of gyro-effect and the route chart to stabilization of permanent maglev rotator are presented.

Key Words

Permanent maglev rotator; Stabilizing approaches; Gyro-effect; Route chart of stabilization

永磁悬浮转子在心脏泵和其它旋转机械中达到稳定平衡的方法

钱坤喜

江苏大学生物医学工程研究所, 镇江, 中国

通讯作者: 钱坤喜, E-mail: kxqian@263.net

【摘要】根据笔者的经验,在永磁轴承支承的旋转体的系统中,通过引入一个非永磁力和永磁力共同作用,或利用一个非永磁轴承和永磁轴承共同作用,以及利用一个所谓的能够使包括永磁悬浮转子在内的所有转子稳定的陀螺效应,是能够使永磁悬浮转子在心脏泵及其它旋转机械中达到稳定平衡的。这篇文章不但呈现了轴向和径向驱动的两种永磁悬浮离心式心脏泵,而且还包括永磁悬浮透平机和工业上使用的永磁悬浮离心泵。在所有这些装置中,永磁悬浮转子通过不同的方式达到稳定平衡。文章最后展示陀螺效应的基本原理并提出永磁悬浮转子达到稳定的路线图。由于百多年来学界普遍认为永磁悬浮不能稳定,本文的结果可能将开启一个永磁悬浮旋转机械研究和应用的新纪元。

【关键词】永磁悬浮转子; 稳定平衡; 陀螺效应; 永磁悬浮稳定的路线图

目前世界上应用最为广泛的滚动轴承,具有结构简单、可靠性强、成本低等优点,但不能满足现代科学和工程特殊的技术要求,譬如,在高转速下连续和耐久运行。笔者在心脏泵的研究中就曾经遇到轴承问题,现有的机械轴承不能避免机械磨损和热量的产生,前者限制了装置的使用寿命,后者将导致血液的破坏。

其他的研究学者应用电磁或液体动压轴承解决血泵机械轴承系统的缺点,但导致一些新的问题,如复杂的转子位置检测和控制,额外的能量损耗等^[1-9]。

永磁轴承能够解决机械轴承和电磁轴承的各自问题，但没有人相信永磁轴承能够达到稳定平衡，因为在1939年，英国科学家通过理论证明永磁悬浮在静止状态下不能达到稳定平衡^[10]。但笔者认为，在运动状态下，永磁悬浮转子的性能和其在静止状态是不同的，永磁悬浮转子在动态会发生什么，到目前为止还没有答案。在过去的30年里，笔者努力研究永磁悬浮体是否可以在动态状态下稳定，并在其研究所和实验室设计和制作了大量的试验模型和永磁悬浮旋转机械的样机，试验结果表明，永磁悬浮旋转体通过不同的方法是能够达到稳定平衡的。

1 引入非永磁力

图1是轴向驱动的永磁轴承离心泵的样机和原理图。

当电流引入电机线圈1，电机转子磁盘2连同叶轮6一起被旋转的磁场驱动而旋转，因此，流体（血液、水或其他）将从泵的入口5流入，并且随转子叶轮一起旋转。最后，流体由于离心力从血泵的出口4流出。转子通过永磁轴承3径向支撑，由于电机铁芯和电机磁盘之间的吸引力，转子与定子之间有一个接触点7。流体通过叶轮传输的同时，在叶轮上产生一个轴向力，推动叶轮向血泵入口方向运动。因此，如果旋转速度和流量足够大，转子将从连接点脱离，这样转子在定子完全悬浮。当转子朝入口方向移动时，永磁轴承有一个轴向反作用力，推动转子向电机线圈方向运动。永磁轴承设计应考虑既能使转子和接触点脱离，又不能完全摆脱电机线圈铁芯的吸引力。转子的最大位移大约1.0mm，与血泵100mmHg的扬程和10L/min的流量对应的位移是0.8mm。这对于左心室辅助泵是足够的。

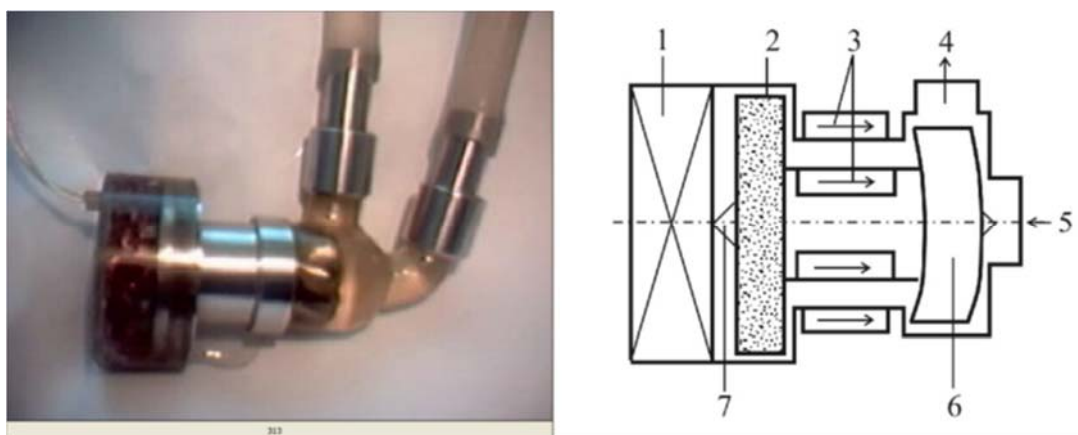


图1：轴向流磁耦合驱动永磁轴承离心血泵的样机（左）和原理图（右）^[11]

1 无刷直流电机线圈和铁芯；2 电机转子磁盘；3 永磁轴承；4 出口；5 入口；6 叶轮；7 接触点

2 使用非永磁轴承

图2是一个径向驱动离心血泵和它的原理图。和上面提到的轴向驱动泵不同，转子磁铁6通过径向电机线圈5驱动而旋转。两个永磁轴承4和7轴向支撑转子^[11]。由于叶轮通过无刷直流电机驱动旋转，流体从入口2传递到出口1。4个霍尔元件8位于装置的末端，测量转子的位置，不是为了像电磁轴承的转子位置测量及控制，而且为了验证转子是否悬浮。

永磁轴承4和7主要在轴向支撑转子，因为它们有大的轴承轴向分力和小的轴承径向分力^[13]。转子在径向主要通过由转子和定子之间的间隙与其中的液体组成的液膜轴承支撑。间隙的尺寸在径向半径方向为0.15mm。

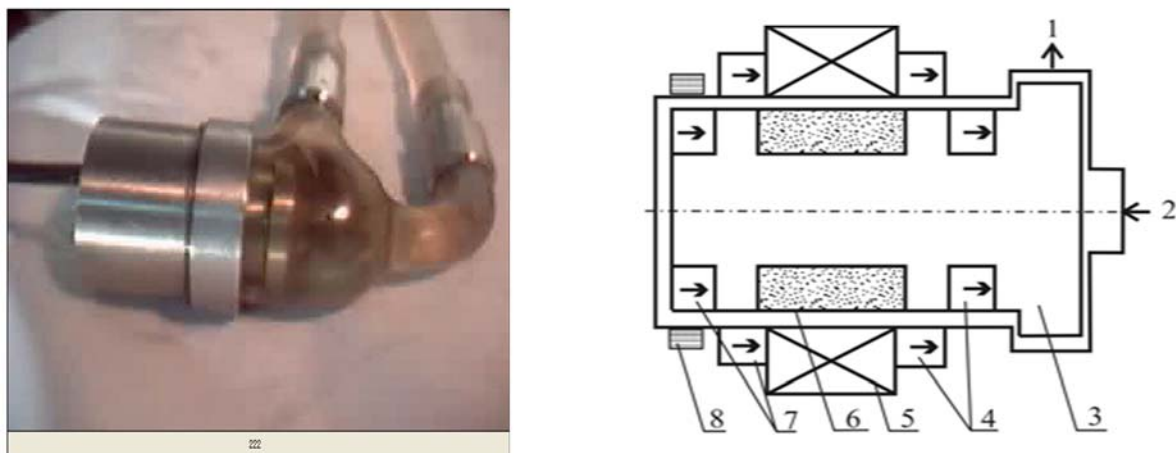


图2：径向驱动离心血泵（左）和它的原理图（右）^[12]

1 出口；2 入口；3 叶轮；4 永磁轴承；5 电机线圈和铁芯；6 转子磁铁；7 永磁轴承；8 霍尔传感器

血动力轴承能帮助永磁悬浮转子获得稳定性，但它不是稳定的先决条件。图3是最新研发的轴向驱动的离心血泵。和图2不同，图3中没有血动力轴承，转子的径向支撑通过电机线圈铁芯和转子磁铁之间的永磁引力提供，该力抵抗转子的偏心移动。图2中，电子线圈铁芯和转子磁铁互相吸引，为了抵消这个吸引力，径向的血动力轴承是必须的。

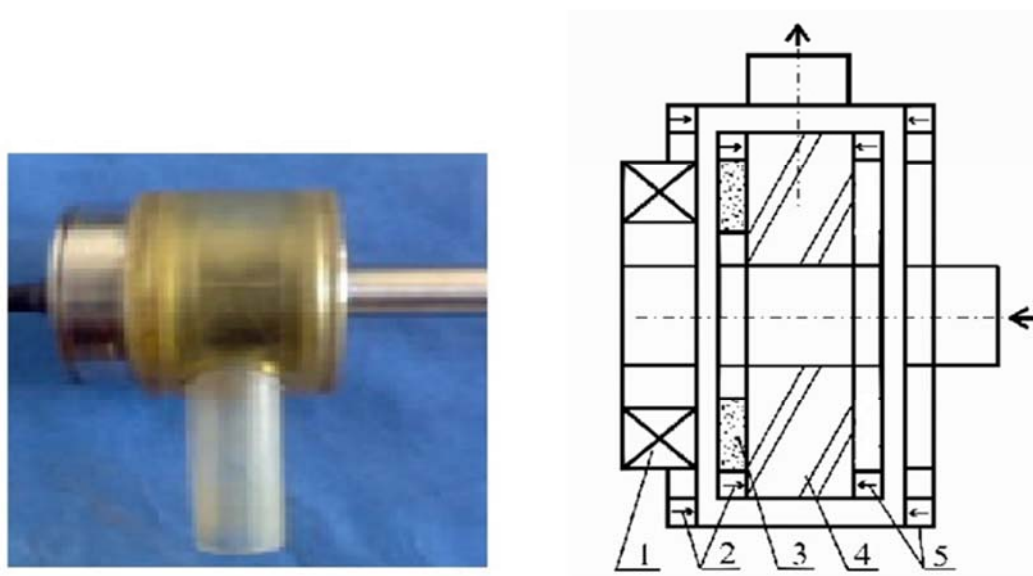


图3：轴向驱动离心血泵（左）和它的原理图（右）

1 电机线圈和铁芯；2 永磁轴承；3 转子磁铁；4 叶轮；5 永磁轴承

为了验证转子是否悬浮，笔者检测径向驱动离心血泵的转子位置（图2），数据如图4所示。转子的最大偏心距明显取决于泵的转速和流速。例如，在3000rpm时，转子和定子之间的最大间隙，即最大偏心距始终能达到转子和定子之间的间隙0.15mm，这意味着转子和定子之间有接触，转子没有悬浮。相反，如果转速高于3250rpm，最大偏心距小于转子和定子之间的间隙，即转子和定子之间没有接触，也就是说转子是悬浮的。高转速和大流量表明转子和定子之间有高的液体压力，液膜轴承力将增大，转子的最大偏心距将变

小。同时，高转速能产生所谓的陀螺效应，这样能够稳定所有的转子，包括永磁悬浮转子。陀螺效应在永磁透平机械中表现更清晰，因为在这里只有空气存在，没有液体形成液膜轴承。

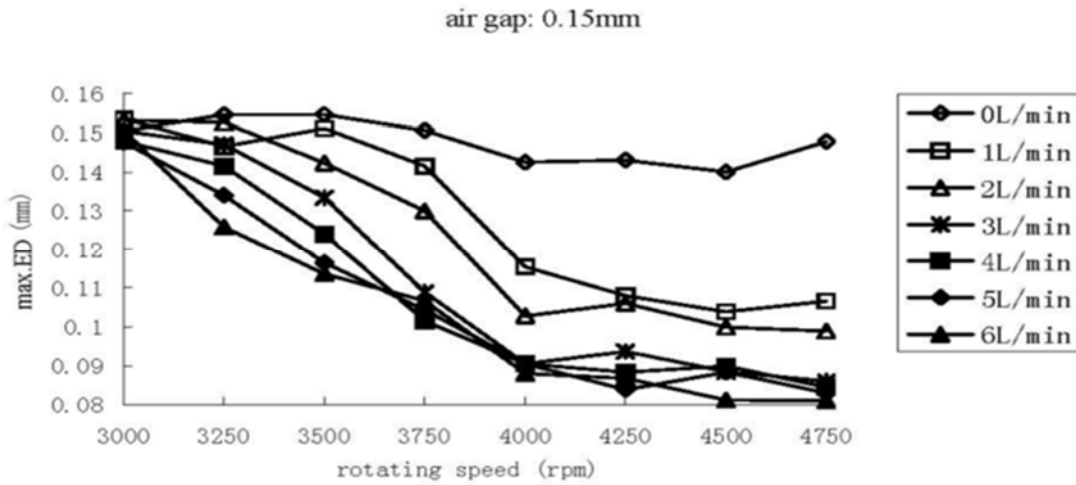


图4：径向驱动离心血泵转子的最大偏心距

3 所谓的陀螺效应的作用

永磁透平机如图 5 所示。左图为装置的实验图，中图和右图分别展示了试验模型和原理图。转子位置检测和永磁离心血泵类似。4-霍尔传感器检测转子磁铁位置并计算到定子之间的距离。开始试验时模型的螺旋桨叶片通过压缩空气驱动旋转，之后移除压缩气流并记录转子的偏心度。图 6 是转子偏心率的测量结果。

转子悬浮通过图 5（右）阐述的永磁轴承实现。这种新的贡献表明，可以通过许多不同的方法单独或共同作用实现永磁悬浮转子稳定性，确保永磁悬浮转子的稳定平衡。



图 5：实验中的永磁悬浮涡轮机（左），它的实验模型（中）和原理图（右）^[15]

1 转子轴线；2 定子磁钢；3 转子磁钢；4 定子磁钢

图 6 表明空气压缩机移除后的前 500ms，转子偏心度（0.09~0.13mm）小于转子和定子之间的间隙（0.15mm）。就是说转子只在前 500ms 悬浮。由于模型的螺旋桨叶片受空气阻力的作用，速度快速下降，转子的悬浮也快速被破坏。

500ms 处相当于转子转速为 1850rpm (图 7)。很明显, 当转子速度高于 1825rpm 时, 转子是悬浮的; 当转子速度逐渐降低到 1850rpm 以下, 转子还是和定子接触。

如上所述, 永磁透平机中没有非永磁力, 也没有非永磁轴承, 如果转速足够高, 转子能够稳定。这就是陀螺效应, 它的原理将在下面展示。

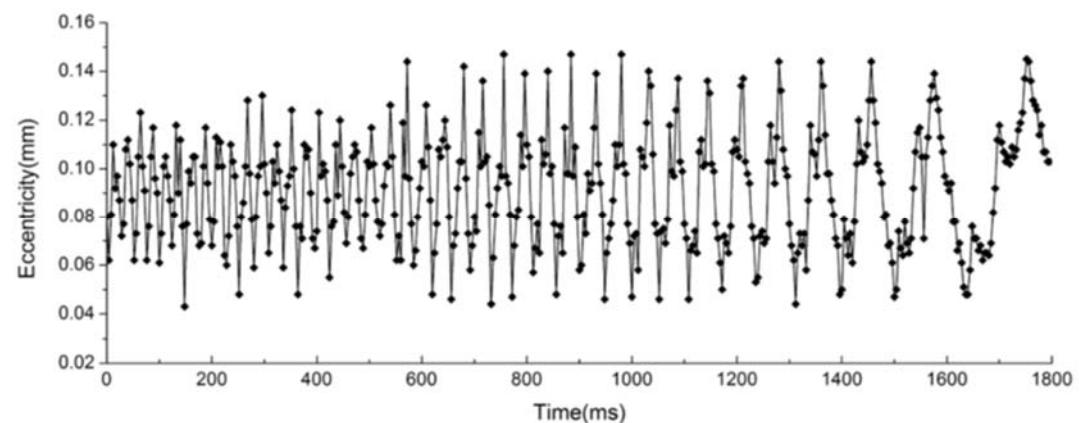


图 6: 永磁悬浮透平机转子的偏心率^[14, 15]。在最初的 500ms, 转子的偏心率大约为 0.13mm, 小于转子和定子之间的间隙, 这意味着转子是悬浮的

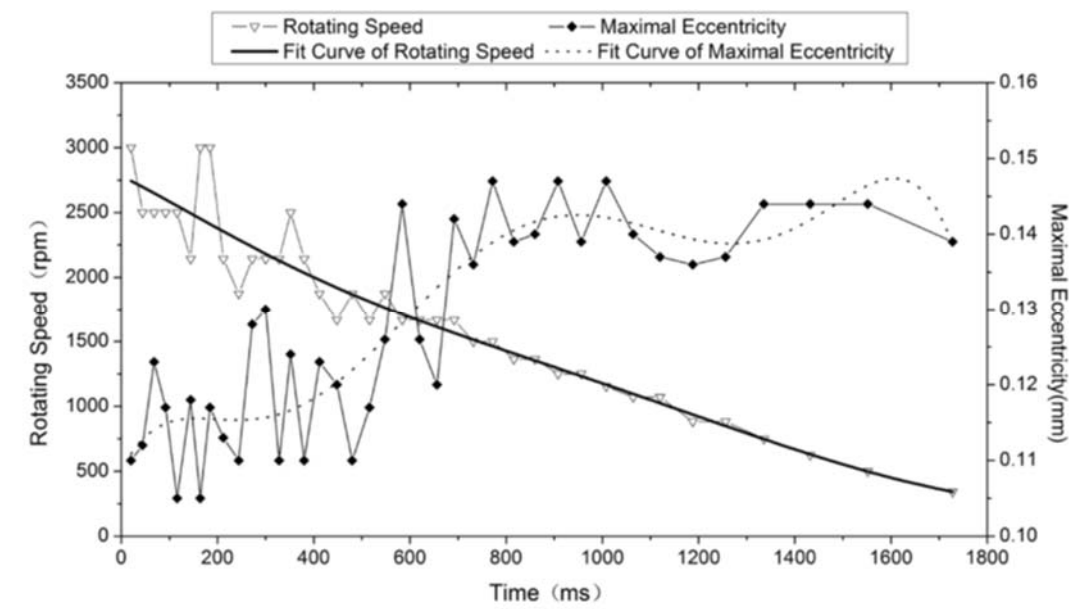


图 7: 转子转速, 最大偏心度和时间之间的关系^[14, 15]

和永磁轴承心脏泵结构相同, 一个新的工业使用的永磁离心泵被研发 (图 8)。它使用交流电机通过轴向磁耦合驱动, 其叶轮类似于 UFO 的磁盘。在这个旋转机械里转子没有转轴, 没有轴承, 挑战千年旋转机械的理念和模式。



图8：工业上使用永磁悬浮离心泵（左）和它的叶轮（右）

4 陀螺效应的原理

陀螺效应如图 9（左）所描述。一个陀螺仪站在一个球上，如果转速足够高，它能够达到稳定平衡。否则，如果它不旋转或旋转速度不够高，它将从球上掉落。

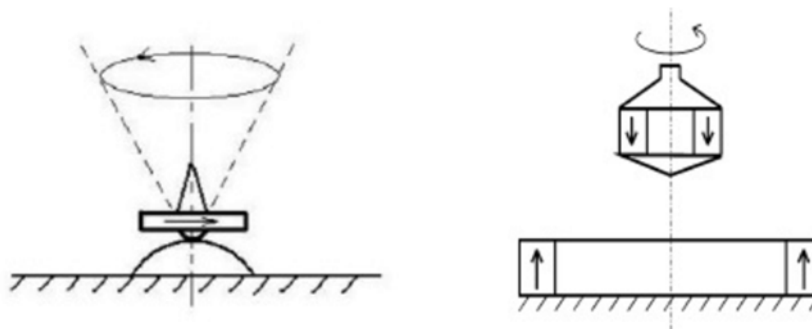


图 9：陀螺效应图解（左）和玩具悬浮陀螺（右）。左：如果速度足够高，陀螺仪能站在球上，但如果停止或转速不够快，它将掉落。右：玩具悬浮陀螺有相同的原理。如果速度足够高，小磁环能在大磁环上旋转，如果速度降到一定值，它将掉落

悬浮陀螺有两个磁环：小磁环在大磁环上面。小磁环旋转，大磁环固定。如果速度足够大，它能悬浮并且在大磁环上面稳定旋转。当小环速度逐渐降低，它稳定悬浮的状态将被破坏，将掉到地面上。悬浮陀螺的磁环方向和笔者的轴承（图 2）不同，这是由于在心脏泵要求轴承占有尽可能小的轴向空间但必须得到尽可能大的轴承力。

陀螺效应能被理解为惯性原理，像牛顿第一定律，如骑自行车：在一定高的速度下，骑车人能避免摔倒，尽管理论上两轮自行车不能达到稳定地站立。人们可能认为自行车运动员使用方向盘控制其稳定，但没有人能维持静止状态下的自行车稳定站立。

稳定平衡和不稳定平衡之间的临界速度，定为最小稳定速度^[16]，其大小由系统的轴承力和旋转惯性决定：轴承力或转子惯性越大，临界速度越低；反之亦然^[17]。

5 永磁悬浮转子稳定平衡的路线图

理论和实验研究之后，永磁悬浮转子稳定平衡的路线图已经清晰（图 10）：(1) 在静止状态下，永磁悬浮不能稳定（恩绍理论）；当转子速度逐渐增加，但没有达到临界速度，永磁悬浮转子也不能稳定。(2) 如果速度等于或大于临界速度，因为陀螺效应，永磁悬浮转子能够稳定悬浮。(3) 临界速度受转子旋转惯性和轴承力的影响，惯性和轴承力越大，临界速度越低。

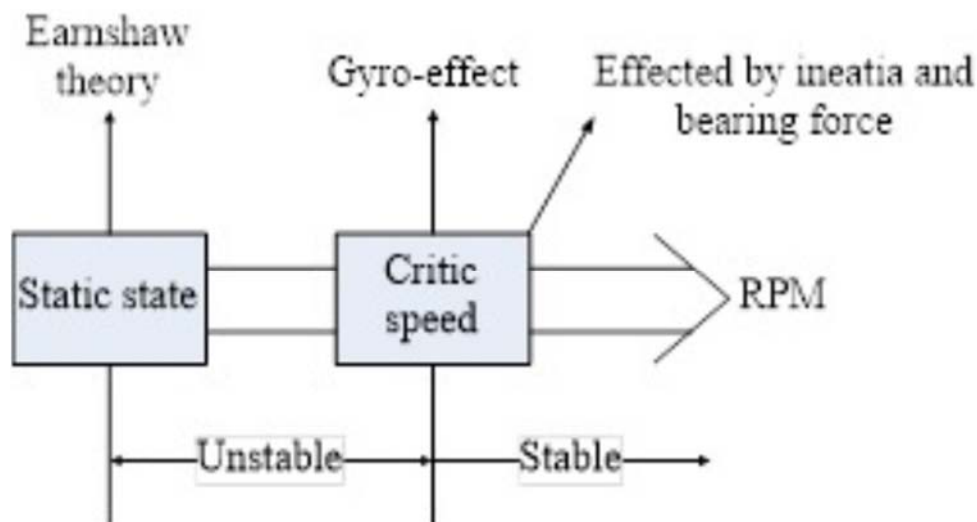


图 10: 永磁悬浮转子稳定平衡的路线图^[18]

6 讨论

永磁悬浮旋转机械和其他悬浮装置相比，有结构简单，价格低和可靠性高等优点^[19]。传统概念由于恩绍理论排斥被动磁浮的可能性。忽视永磁悬浮的人中，极少人知道恩绍原理是在静止状态下推导出来的。事实上，恩绍原理的结论对永磁悬浮的动态平衡是无效的，必须有其他的原理回答这个问题。

本文呈现了永磁悬浮转子稳定悬浮的路线图。它试图解释是否和为什么永磁悬浮转子能达到稳定平衡。

7 结论

“永磁悬浮不能稳定”的误解延续了 100 多年。首先，很多人认为恩绍已经从理论上证明了这一概念，但他们不知道恩绍原理有两个先决条件：(1) 只有永磁力的作用；(2) 整个系统在静止状态。事实上，在运转时，大多数实例几乎不可能排除永磁力之外的其他力。图 9（右）中，磁浮陀螺能够稳定由于重力和永磁力达到平衡。如果重力不存在，它不能旋转并悬浮。其次，旋转体在机械中为了某种目的工作，它不能永远保持静止。这意味着恩绍原理不适用永磁悬浮旋转机械。

【参考文献】

- [1] Hoshi H, Shinshi T, Takatani S. Third-generation blood pumps with mechanical non-contact magnetic bearings. *Artificial Organs*, 2006,30(5): 324-328.
<http://dx.doi.org/10.1111/j.1525-1594.2006.00222.x>
- [2] Goldowsky M. Mini hemo-reliable axial flow LVAD with magnetic bearings. Part 1-3. *ASAIO J*, 2002,48(1): 96-105.
<http://dx.doi.org/10.1097/00002480-200201000-00018>
- [3] Mueller J, Nuesser P, Weng Y, et al. The first ventricular cardiac assist device without any wear and tear in a clinical multi-center trial. *ASAIO J*, 2003,49(2): 162.

- <http://dx.doi.org/10.1097/00002480-200303000-00087>
- [4] Akamatsu T, Nakazeki T, Itoh H. Centrifugal blood pump with a magnetically suspended impeller. *Artif Organs*, 1992,16(3):305–308.
<http://dx.doi.org/10.1111/j.1525-1594.1992.tb00317.x>
- [5] Abe Y, Ishii K, Isoyama T, et al. The helical flow pump with a hydrodynamic levitation impeller. *J Artif Organs*, 2012,15(4):331–340.
<http://dx.doi.org/10.1007/s10047-012-0659-z>
- [6] Pirbodaghi T, Cotter C, Bourque K. Power Consumption of Rotary Blood Pumps: Pulsatile Versus Constant-Speed Mode. *Artificial Organs*, 2014, 20.
<http://dx.doi.org/10.1111/aor.12323>
- [7] Pirbodaghi T, Axiak S, Weber A, et al. Pulsatile control of rotary blood pumps: Does the modulation waveform matter? *The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*, 2012, 144(4):970–977.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jtcvs.2012.02.015>
- [8] Asama J, Shinshi T, Hoshi H, et al. A Compact Highly Efficient and Low Hemolytic Centrifugal Blood Pump With a Magnetically Levitated Impeller. *Artificial Organs*, 2006,30(3):160–167. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1525-1594.2006.00202.x>
- [9] Pirbodaghi T, Asgari S, Cotter C, et al. Physiologic and hematologic concerns of rotary blood pumps: what needs to be improved? *Heart failure reviews*, 2014,19(2):259-266.
<http://dx.doi.org/10.1007/s10741-013-9389-4>
- [10] Earnshaw S. On the nature of molecular forces which regulate the constitution of the luminiferous ether. *Trans Camb Phil Soc*, 1839,7(1):97-112.
- [11] Qian KX, Zeng P, Ru WM, et al. New concepts and new design of permanent maglev rotary artificial heart blood pumps. *Med Eng Phys*, 2006,28(4):383-388.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.medengphy.2005.07.007>
- [12] Qian KX, Yuan HY, Zeng P, et al. A novel permanent maglev rotary LVAD with passive magnetic bearings. *J Med Eng Technol*, 2005, 29(5):235-237.
<http://dx.doi.org/10.1080/0309190512331309335>
- [13] Qian KX, Zeng P, Ru WM, et al. Novel magnetic spring and magnetic bearing. *Magnetics*. 2003, 39 (1):559-561.
<http://dx.doi.org/10.1109/TMAG.2002.806524>
- [14] Qian KX, Jing T, Wang H. Applications of Permanent Maglev Bearing in Heart Pumps and Turbine Machine. *ISRN Mechanical Engineering*, 2011,(2011): 4 pages.
<http://dx.doi.org/10.5402/2011/896463>
- [15] 钱坤喜, 许自豪, 王颢, 等. 新型永磁悬浮轴承在透平机及心脏泵中的应用. *江苏大学学报 (自然科学版)*, 2011,32 (6) : 663-666.
doi:10.3969/j.issn.1671-7775.2011.06.009
- [16] Qian KX, Zeng P, Ru WM, et al. Permanent magnetic-levitation of rotating impeller: a decisive breakthrough in the centrifugal pump. *J Med Eng Technol*, 2002, 26(1):36-38.
<http://dx.doi.org/10.1080/03091900110060785>
- [17] Qian KX, Xu ZH, Wang H. Effects of rotational inertia and bearing force on stability of permanent maglev rotator. *Applied Mechanics and Materials*, 2012,150: 50–56.
<http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.150.50>
- [18] Qian KX, Jing T. Route chart to stabilizing permanent maglev rotator. *Advanced Materials Research*, 2013,785: 1586–1589.
<http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.785-786.1586>
- [19] Sinha PK. Electromagnetic suspension: dynamics and control. *IEE Control Eng Ser*, 1987. ISBN: 978-0863410635.