

文章编号:1000-5862(2004)02-0099-03

辐射阻尼力和电磁质量的动力学本质

黄沛天, 马善钧, 胡利云

(江西师范大学 物理与通信电子学院, 江西 南昌 330027)

摘要:“辐射阻尼力”是一种力变率的猝量. 电磁质量是辐射反作用力变率的另一作用效果. 辐射反作用力变率的物质来源是带电粒子的辐射场.

关键词:变加速动力学; 力变率; 猝量; 辐射阻尼力; 电磁质量; 辐射场

中图分类号: O 442; O 313 **文献标识码:** A

带电粒子的电磁场对粒子本身的反作用问题, 从 20 世纪初开始, 一直是物理学家十分关注的问题. 尽管在经典电动力学范围内不能完全解决它, 但是人们还是在经典框架内找到了辐射反作用产生的两种效果^[1-3]辐射阻尼力:

$$\vec{F}_{\text{辐射}} = \frac{2}{3} \frac{e^2}{c^3} \dot{\vec{v}} = m\tau \ddot{\vec{v}} \quad (1)$$

和电磁质量

$$m_{em} \approx \frac{U}{c^2} \quad (2)$$

若把辐射阻尼力写入牛顿运动方程, 便得阿伯拉罕-洛仑兹运动方程^[2]

$$m(\dot{\vec{v}} - \tau \ddot{\vec{v}}) = \vec{F}_{\text{外}} \quad (3)$$

但是这两种效果在动力学方面却带来一些认识上的障碍, 也迫使人们继续进行必要的探索. 比如, 辐射阻尼力不是瞬间力, 它代表一种平均效应^[3]. 而人们却把它写入了表示瞬间关系的牛顿运动方程. 由此得到的(3)式有时还会呈现“奔离”解^[2]. 为了避开“奔离”解, 人们用了一个专门的积分微分方程^[2]代替(3)式, 但仍然排除不了“ t 时刻的加速度依赖于 t 以后时刻的作用力”这种因果概念的矛盾. 不过, 文献[2]指出, 这种反因果效应局限于数量级为 $\tau \sim e^2/mc^3 \sim 10^{-24}$ s 的时间间隔内. 在辐射阻尼很小的情况下, 人们可用逐步逼近法^[4]求解由(3)式得到的某些方程, 等等. 而电磁质量的正确计算则牵涉到目前尚不清楚的带电粒子(比如电子, μ 子)内部结构等问题, 这也有待进一步的探索.

虽然存在上述一些尚未解开的疙瘩, 但是辐射阻尼和电磁质量等概念在量子理论中也仍然是重要的. 这里仅从变加速动力学的角度对辐射阻尼和电磁质量的产生给出一种恰当的描绘和解释.

1 变加速动力学概念

1981 年, 黄沛天^[5]引入了力变率公式:

$$\vec{C} = \dot{\vec{F}} = m \dot{\vec{j}} = m \dot{\vec{a}} = m \dot{\vec{v}} = m \ddot{\vec{r}} \quad (4)$$

式中 $\vec{C} = \dot{\vec{F}}$ 为力 \vec{F} 随时间的变化率, 简称力变率; $\dot{\vec{j}} = \dot{\vec{a}} = \dot{\vec{v}} = \ddot{\vec{r}}$ 为物体 (m) 运动的加速度随时间的变化率, 被称做急动度. 1997 年, 吴大猷^[6]引入了猝量方程:

$$J = \int_0^{\tau} m \ddot{x} dt = m \dot{x}_{\tau} - m \dot{x}_0 \quad (5)$$

收稿日期: 2003-06-10

作者简介: 黄沛天(1940-), 男, 江西吉安人, 教授, 主要从事力学研究.

2003年,黄沛天等人^[7]在导出了加速度能定理之后,连同力变率公式和猝量方程一起,提出了变加速动力学一说.

下面谨用力变率和猝量等概念来考察带电粒子的辐射反作用问题.

2 “辐射阻尼力”是一种猝量

文献[3]已经指出,辐射阻尼力不是瞬间力,它是一种平均效应.这里还应当指出,它也不是力的平均,而是力变率(或急动度)的平均产生的“力增量”效应.为此说明如下,先将猝量方程写做

$$\vec{j} = \int_0^\tau \vec{C} dt = \overline{(d\vec{F}/dt)} \cdot \tau = m \overline{(\ddot{v})} \tau = m \vec{r}_\tau - m \vec{r}_0 \quad (6)$$

式中 $\overline{(d\vec{F}/dt)} = \int_0^\tau \vec{C} dt / \tau$ 为力变率平均值, $\overline{(\ddot{v})}$ 为急动度平均值.再将(6)式与(1)式相对照就会发现,(1)式中的 \ddot{v} 可看做是急动度在特征时间 τ 内的平均值 $\overline{(\ddot{v})}$,因此,(1)式可写做

$$\vec{F}_{\text{辐射}} = m\tau \overline{(\ddot{v})} = m \vec{r}_\tau - m \vec{r}_0 \quad (7)$$

这就表明,“辐射阻尼力”是辐射反作用平均力变率 $m \overline{(\ddot{v})}$ 在特征时间 τ 内的猝量.它等于力函数的增量 $(m \vec{r}_\tau - m \vec{r}_0)$.

3 电磁质量

由于辐射阻尼和电磁质量是辐射反作用同时呈现的两种效应,这就表明,在特征时间内,带电粒子的运动不仅是变加速运动,而且还是变质量运动(这里尚未涉及相对论效应).因此,描写粒子运动的力变率公式须采用全导数形式

$$\vec{C}_{\text{辐射}} = \dot{\vec{F}} = m \ddot{v} + \dot{v} \dot{m} \quad (8)$$

然后将(8)式对时间积分得

$$\int_0^\tau \vec{C}_{\text{辐射}} dt = \int_0^\tau m \ddot{v} dt + \int_{m_0}^{m_\tau} \dot{v} dm = \overline{(m \ddot{v})} \tau + \overline{\dot{v}} (m_\tau - m_0) \quad (9)$$

式中的 $\overline{(m \ddot{v})} = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau m \ddot{v} dt$, $\overline{\dot{v}} = \frac{1}{(m_\tau - m_0)} \int_{m_0}^{m_\tau} \dot{v} dm$.显然,(9)式右端的第一项对应于(7)式或(1)式描写的“辐射阻尼力”,而(9)式右端的第二项则可用来解释带电粒子做变加速运动时呈现的电磁质量

$$m_{em} = m_\tau - m_0 \quad (10)$$

前述的(2)式仅表示电磁质量在量值上大致为库仑场能量 U 除以光速的平方 c^2 .

4 辐射反作用力变率的物质来源

《费曼物理学讲义》^[8]在谈论“力是什么?”这个话题时,曾经指出:“如果一个物体正在被加速,那么上面就有一个力”。“力的最重要的特性之一是它具有物质来源,而不只是一个定义.”当谈论力变率时,我们也可以说:如果一个物体的加速度(有时还包括质量)正在被改变,那么在它上面就有一个力变率的作用,同样,力变率也具有其物质来源,而不只是一个定义.

(8)式、(9)式就生动描写了带电粒子辐射反作用力变率及其作用效果的客观存在.而这种力变率的直接物质来源就是辐射场.

5 对一种不恰当评述的评述

文献[9]认为,“受一定力的物体,其基本动力学与 d^2v/dt^2 无关,也与更高阶的速度对时间的微商无关.任何这种复杂性丝毫不出现,这本身就是一个值得注意的结果,就目前我们所知,即使在非常高速的‘相对论’区域里,这结果也仍旧成立.”显然,这种评述无视辐射阻尼和阿伯拉罕-洛伦兹方程中存在 d^2v/dt^2 .因

此,该评述是片面的.应该说,正是辐射阻尼、电磁质量、阿伯拉罕-洛伦兹方程等问题中出现的复杂性,引起了物理学家的关注.而且文献[10]还指出,在相对论情况下,含 d^2v/dt^2 的辐射阻尼力 f_i 可能是作用于带电粒子上的主要力,并给出了动力学方程的四度形式 $mc \frac{du_i}{ds} = \frac{e}{c} F_{ik} u_k + f_i$.

6 结论

综上所述,我们可得下面一些结论:

- 1) 辐射反作用力变率是一种客观存在,它的直接物质来源是带电粒子的辐射场.
- 2) 辐射阻尼和电磁质量都是辐射反作用力变率在特征时间内的积累效应;
- 3) 辐射阻尼力的动力学本质是辐射反作用力变率在特征时间内的猝量,它等于带电粒子在特征时间内运动力函数的增量;
- 4) 电磁质量的动力学本质则是在特征时间内带电粒子在力变率作用下产生的质量的增量.

参考文献:

- [1] 曹昌祺.电动力学(第2版)[M].北京:人民教育出版社,1962.233.
- [2] 杰克逊 J D. 经典电动力学(下册)[M].朱培豫译.北京:高等教育出版社,1980.377-400.
- [3] 郭硕鸿.电动力学(第2版)[M].北京:高等教育出版社,1997.321.
- [4] 胡宁.电动力学[M].北京:人民教育出版社,1963.120-126.
- [5] 黄沛天.一个描写机械运动的新概念——急动度[J].物理,1981,10(7):394.
- [6] 沈惠川.吴大猷先生点评《经典力学》[J].物理,2000,29(12):743.
- [7] 黄沛天,黄文,胡利云.变加速运动理论与实践意义初探[J].江西师范大学学报(自然科学版),2003,27(1):8.
- [8] Feynman R P, Leighton R B, Sands M. The Feynman Lectures on Physics, (I)[M]. Massachusetts: Addison Wesley Pub Co, Reading, 1963.12-1.
- [9] 弗伦奇 A P. 牛顿力学(1)[M].郭敦仁、何成钧译.北京:人民教育出版社,1978.172.
- [10] 朗道 Л И, 栗弗席兹 E M. 场论[M].任朗,袁炳南译.北京:人民教育出版社,1959.249-251.

The Dynamical Nature about Damping Force of Radiation and Electromagnetic Mass

HUANG Pei-tian, MA Shan-jun, HU Li-yun

(College of Physics and Communication Electronics, Jiangxi Normal University, Nanchang 330027, China)

Abstract: The damping force of radiation is a jumpulse of the time rate of change of force. The electromagnetic mass is another effect of the time rate of change of radiant reacting force. The material origin of the time rate of change of radiant reacting force is the radiation field.

Key words: dynamics of varying accelerated motion; time rate of change of force; jumpulse; damping force of radiation; electromagnetic mass; radiation field

(责任编辑:聂咏国)