

彗星的非引力效应

胡中为

(南京大学天文系, 南京 210008)

阎林山

(中国科学院上海天文台, 上海 200030)

提 要

彗星的准确轨道运动的确定是个复杂而困难的问题, 其显著特点是存在非引力效应。本文评述彗星的非引力效应研究进展, 首先回顾这种效应的发现与解释, 接着概述标准非引力加速度模型及其结果, 最后简述其他非引力模型和讨论彗星爆发与喷流活动产生的短期非引力效应问题及展望。

一、非引力效应的发现与解释

从彗星的天体测量资料来推算其准确轨道运动是个复杂而困难的问题, 这是因为彗星绕太阳公转轨道运动中不仅受到行星的引力摄动, 而且还存在着跟彗星自身性质有关的非引力效应(non-gravitational effect)^[1]。研究彗星的非引力效应不仅有助于改进其轨道推算, 而且有助于了解彗星的物理性质和过程。

Encke 彗星是继哈雷彗星之后第二颗被预言回归的彗星。Encke 算出它的公转周期为 3.3 年, 还发现它早于预报时间 0.1 天过近日点, 即公转周期以 0.1 天/周期在减小, 并以介质阻尼来解释其长期加速运动^[2]。以后又发现另一些彗星也有类似的公转周期变短或变长现象, 例如哈雷彗星的公转周期以 4.1 天/周期在增加^[3]。彗星公转运动的这种长期加速或减速是在作了行星引力摄动改正后仍存在的系统效应, 是万有引力作用无法解释的, 故称之为非引力效应。

自发现非引力效应以来的一个多世纪中, 先是争议彗星是否真的受到非引力性质的作用力并有可观测的效应。仔细研究表明, 彗星的精确观测定位与包括行星摄动的准确计算位置之间确实有系统偏差, 而且时间越长, 系统偏差越大, 三次回归可达几个角分。系统偏差说明彗星确实受到非引力性质的附加作用力; 另一争议是非引力作用力取什么形式——是孤立脉冲式的, 还是连续式的。研究结果支持连续式作用的推测^[1]。

介质阻尼只能解释像 Encke 彗星那样的加速运动, 而不能解释像哈雷彗星那样的减速运动, 因此非引力效应的原因不是介质阻尼。Bessel 注意到哈雷彗星 1835 年回归期中太阳的物质羽很像燃放的火箭, 提出彗星排放物质的反冲作用(火箭效应)来解释非引力效应^[2]。经过一个多世纪, 直到 1950 年 Whipple 由非引力效应而提出彗核的冰冻团块模型(icy con-

glomerate model)^[4]。Whipple 认为, 彗核是由冰(H₂O 冰及其他冰)和尘埃冻结在一起的整体团块, 其显著特性是彗核受足够强的太阳辐射而发生冰升华并带出尘埃, 且主要从受太阳照射的一侧升华, 产生反冲力, 这等效于减小有效的太阳引力; 又由于彗核有自转及彗核的热惰性, 升华抛出的物质流量最大方向, 随彗核自转而偏离日彗向径方向一个角度, 因此反冲力偏离向径方向, 这样就可以很好地解释彗星的非引力效应(图 1)。若彗核自转轴垂直于其轨道面, 且自转与公转轴方向相同(顺向自转), 则反冲力的切向分量使彗核公转运动加速; 而逆向自转则使彗核公转减速。若彗核自转轴不垂直于其轨道面, 则反冲力还有垂直于轨道面的法向分量。如果彗核没有自转, 反冲力完全是向径方向的; 如果彗核自转非常快, 抛出物质就失去主导方向, 非引力效应就很小^[2]。

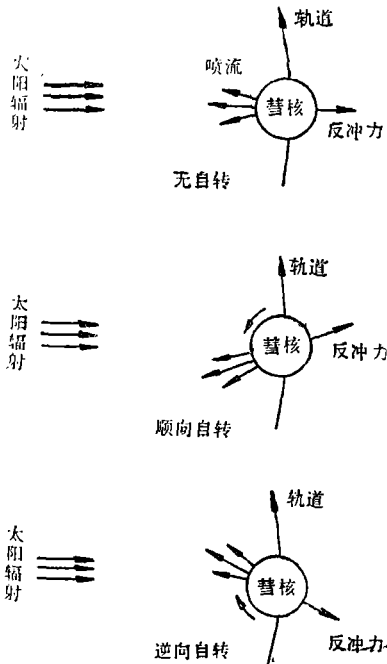


图 1 彗核蒸发喷流的反冲力导致非引力效应

Marsden 在彗星的运动方程中填加了非引力加速度项, 最初经验地取为形式 $A_i r^{-3} e^{-\beta_i \tau} e^{-r^2/l^2}$, $i=1, 2, 3$ 分别为轨道面上的向径分量、切向分量和轨道面法向分量, r 为日彗距, τ 为从吻切历元起算的时间, A_i 和 β_i 是由彗星天体测量定位资料求解的非引力参数^[6-8]。对一些彗星的非引力效应研究, 得到如下结果: 非引力的径向加速度约比切向加速度大一个量级, 说明延滞角(彗核抛出物质主导方向与彗星中心—太阳方向的夹角)不大; 切向加速度有正(沿彗星运动方向)、也有负, 说明彗核自转有顺向的、也有逆向的; 法向加速度在动力学上不重要(A_3 很小); 非引力作用力似乎是连续的, 且可能随时间减小; 在某些情况下, 彗星接近木星后非引力作用力可以增大。非引力的斥力一般是太阳引力的 10^{-6} 量级。

Marsden、Sekanina 和 Yeomans 进一步把经验的非引力项改为基于 H₂O 雪蒸发率的形式, 并假定它对近日点是对称的, 将彗星运动方程写为,

$$\frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} = -\frac{\mu \mathbf{r}}{r^3} + \frac{\partial \mathbf{R}}{\partial r} + A_1 g(r) \hat{\mathbf{r}} + A_2 g(r) \hat{\mathbf{T}} \quad (1)$$

$$g(r) = \alpha (r/r_0)^{-m} [1 + (r/r_0)^n]^{-k} \quad (2)$$

其中, μ 为万有引力常数与太阳质量乘积, R 为行星摄动函数, $\hat{\mathbf{r}}$ 和 $\hat{\mathbf{T}}$ 为日—彗向径方向及垂直于 $\hat{\mathbf{r}}$ 、沿彗星运动方向的单位矢量, $A_1 g(r)$ 与 $A_2 g(r)$ 分别为向径与切向非引力加速度, 标度距离 r_0 是彗核再辐射的太阳能超过冰蒸发能的日彗距。对于 H₂O 冰, $r_0 = 2.808 \text{ AU}$, 归化常数 $\alpha = 0.111262$ (即 $r = 1 \text{ AU}$ 时, $g(r) = 1$), $m = 2.15$, $n = 5.093$, $k = 4.6142$ 。改变 r_0 , (2) 式也适用于其他冰。彗核的蒸发流量 $Z(r)$ 有经验公式

二、标准的非引力加速模型

近 20 多年来, 彗星的非引力效应得到广泛研究^[5]。

$$Z(r) = Z_0 g(r) \quad (3)$$

在精度 $\pm 5\%$ 内, (3) 式符合于彗核蒸发资料^[9,10]。这种模型已广泛用于计算许多彗星的非引力参数 A_1 和 A_2 , 成为标准(或对称的)非引力加速模型。一般对某一彗星用三次以上回归的天体测量资料, 同时由运动方程解出其轨道根数和非引力参数。这样得到的 A_1 值往往不够好, 但它常是正值且比 A_2 值大一个量级, A_2 值则较好且有正、也有负(跟彗星自转方向有关)。

在 63 颗各回归三次以上的彗星中, 仅 10 多颗没有明显的非引力效应, 这可能有三种原因^[11,12]: (a) 近日距 q 大于 r_0 , 以致太阳辐射又被彗核冰再辐射掉, 而彗核冰未升华, 例子有 $P/Oterma$ 、 $P/Smirnova-Chernykh$ 、 $P/Schwassmann-Wachman 1$ 彗星, 它们的 q 在 3—6AU; (b) 彗星已损失掉冰成分, 例子有 $P/Arend-Rigaux$ 、 $P/Neujmin 1$, 它们的 q 约 1.5AU, 一般外貌像小行星; (c) 彗核自转轴在其轨道面上, 明确的例子很难列举, 但 $P/Tsuchinshan 1$ 、 $P/Holmes$ 、 $P/Reinmuth 2$ 彗星可能属于此种。应指出的是, 虽然 $P/Holmes$ 和 $P/Schwassmann-Wachman 1$ 有以亮度爆发形式的非引力活动, 但似乎没影响它们的轨道运动; $P/Crommelin$ 彗星的轨道运动在长约 1 个世纪都未受非引力效应影响, 虽然需引入小的非引力作用力才能联接 1873、1928、1956、1984 年的观测, 此彗星似乎在过近日点($q = 0.7AU$)前后短时间是活动的, 因而属(b)种原因, 或许(c)种原因也起作用。

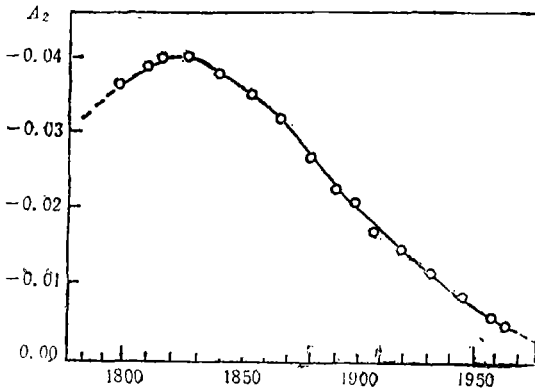


图 2 Encke 彗星切向非引力参数 A_2 随时间的变化

约 31 颗彗星有明显的非引力效应, 它们的 A_2 值或为常数或随时间减小。这些彗星(包括哈雷彗星和 $P/Encke$)的活动趋于衰退之中, $P/Arend-Rigaux$ 和 $P/Neujmin 1$ 的活动衰退更严重, 虽然自转轴的长期变化也起一些作用。有些彗星(包括 $P/Giacobini-Zinner$)的 A_2 略有增大, 说明它们的自转轴有变化; 还有几颗彗星(包括 $P/Kopff$)的 A_2 值改变正负符号, 支持自转轴改变的看法。 A_2 值变化的最好例子是 $P/Encke$ 彗星, 从 1786—1971 年 59 次回归观测资料算出的 A_2 值示于图 2^[10],

它先是增大, 在 1825 年左右达最大, 然后连续减小; 1910 年以前, $-0.8 < A_1 < 1.1$, 之后 A_1 值变化于 $-0.99 - +0.03$ 。它的 A_1 值和 A_2 值之间、以及 A_1 、 A_2 值与亮度之间都不相关。这样的非引力效应情况可用彗核非球形或仅其部分表面活动区抛出物质的模型来解释, 并且彗核自转轴有进动和摆动。由不同时期的天体测量资料计算哈雷彗星轨道的解, Yeomans 得到它的非引力参数如下^[13]: 1835—1984 年, $A_1 = 0.1471 \pm 0.0195$, $A_2 = 0.015460 \pm 0.000017$; 1759—1911 年, $A_1 = 0.1083 \pm 0.0217$, $A_2 = 0.015683 \pm 0.000011$; 1682—1836 年, $A_1 = -0.0081 \pm 0.1087$, $A_2 = 0.015324 \pm 0.000017$, 单位是 $10^{-8} AU/天^2$, 在不同时期 A_2 值基本保持不变, 这说明其自转状况保持[不]变。Sitarski 和 Ziolkowski 用公元前 240 年至 1986 年观测资料, 把 A_1 和 A_2 作为常数, 算出 $A_1 = 0.6251$ 和 $A_2 = 0.01519$; 而把 A_1 作为常数, 取 $A_2 = A_{02}(1 - B \cdot t)$, 则得到 $A_1 = 1.3347$, $A_{02} = 0.01604$, $10^4 B = -0.00495$, 其中

t 是从 1986 年 2 月 19.0 日(ET)起算的天数^[14], B 为系数。因此, A_2 值是否有长期变化仍不能作出定论。哈雷彗星的一些观测资料显示有 2.2 天和 7.4 天两种周期, 已提出几种不同解释, 有些研究得到其彗星顺向自转的证据, 总自转矢量约 2.2 天, 而 Belton 怀疑 2.2 天周期的真实性^[15]。

把(1)式中的非引力项作为径向和切向的扰动加速度, $R_p = A_1 \cdot g(r)$, $T_p = A_2 g(r)$, 则彗星轨道半长径 a 的时间变化率为,

$$\frac{da}{dt} = \frac{2}{n\sqrt{1-e^2}} \left[e \sin v R_p + \frac{p}{r} T_p \right] \quad (4)$$

其中, n, e, v, r 分别为彗星的轨道平运动、偏心率、真近点角和日彗距, $p = a(1-e^2)$ 为半通径。由此可见, 对于顺向自转的彗星(T_p 为正), 其轨道半长径随时间 t 增大; 对于逆向自转的彗星(T_p 为负), 则轨道半长径随时间减小。由于上述关于近日点对称的假设及向径 R_p 对 a 影响(通过 $\sin v$)的周期性, 长时间的平均效果是向径 R_p 对 a 影响小于 T_p 对 a 的影响, 即主要是切向非引力作用使 a 有长期变化。

彗星运动方程(1)中也应附加(轨道)法向非引力项 $A_3 g(r)$, 但大多数彗星 A_3 很小, 不能明显地改善轨道解, 只是对 P/Kopff 彗星的运动有些改善^[16]。后来, Rickman 等成功地联接 P/Kopff 彗星的 5 次回归, 取 A_2 和 A_3 随时间线性变化, 解出 A_1, A_2 和 A_3 ^[17]。虽然在彗星运动方程中附加了自由参数可减小总残差, 但应慎重, 对所得结果及其形式误差不要过分赋予物理意义。此外, 在彗星运动方程中加些变量的较短时段解, 未必会改善轨道预报能力。

不管标准的、对称的非引力加速度模型是否反映了彗核的排气现象, 它终究较好地改善了短周期彗星的星历表预报精度; 对于有长期观测史的彗星, 预报的过近日点时间准确到十分之几天。但是, 至少有 8 颗长周期彗星仅出现一回, 满意地拟合观测资料也需求出非引力参数, 但拟合的改善未必意味着预报能力的改善, 没有观测其下次回归, 就很难确定非引力参数的物理意义及其反映的长期运动变化。

三、其他的非引力模型

除了上述标准的、对称的非引力加速度模型之外, 还有其他的非引力效应模型。Brady 和 Carpenter 用太阳径向加速度随时间线性减小的方法来表达哈雷彗星的运动^[18]。Sitarski 应用传统的平运动长期变值法, 且直接结合到彗星的直角坐标运动方程中^[19]。这些方法可满意地表达现有观测资料, 甚至满意地预报彗星运动, 但没有适宜的物理模型作依据。

Rickman 和 Froeschle 提出彗核的热模型, 并用于研究彗星的非引力加速度如何受其模型参数(尤其是热惰性)改变所影响^[20]。他们得出, 在特定轨道位置上, 径向、切向和法向三分量都对假定的彗星热惰性及自转敏感。他们的热流模型未预示上述标准模型那样的普适加速度规律, 即热模型中三个非引力加速度分量各随日彗距有不同的变化, 以致(2)式 $g(r)$ 一般与他们的结果不符。Landgraf 用此热模型未改善哈雷彗星 1607—1985 年的资料拟合, 对热惰性 8 倍、自转周期 5 倍范围求解, 但最后的平均残差跟标准模型一样^[21], Landgraf 也

用标准模型、但对哈雷彗星轨道的三段($r < 1.0\text{AU}$, $r > 1.0\text{AU}$ 过近日点之前及之后)求解非引力参数 A_1 、 A_2 、 A_3 , 以探讨它们随轨道上位置的变化, 但得出的结论是自转轴几乎位于轨道面上, 这跟飞船结果不同^[21]。

Yeomans 曾按哈雷彗星 1910 年的不对称亮度曲线标度及改变彗核的三个取向角度来建立它的非引力效应模型, 得到自转轴对轨道面法线夹角 30° 时(这与飞船摄像导出结果差 10°)均方根残差最小, 仍说明对称的加速度模型可以较好地拟合观测资料^[13]。Hechler 等指出, 以哈雷彗星 1910 年不对称亮度曲线来标度径向非引力加速度, 可得到轨道改进的结果, 但他们尝试用热模型(这比标准模型更合理)改进轨道解则未成功^[5]。

Yeomans 和 Chodas 修改标准(对称的)非引力加速度模型, 取 H_2O 冰蒸发曲线峰值在彗星过近日点之前或之后一定天数^[22]。跟标准模型比较, 这一新的、不对称模型往往能改善资料的拟合程度。但对天体测量资料的最佳拟合所取天数一般偏离目视亮度曲线峰。这种不对称模型更准确地描写彗星排气史, 得到的径向与切向非引力参数常常不同于标准(对称)模型的结果。因此, 这些参数很不确切, 用它们推断彗星的物理性质的工作应当再作考察: 彗核的自转和进动特性随所用模型而不同, 例如, 不对称模型仅很弱地表明哈雷彗星顺向自转, 也得出以前关于 P/Kopff 彗星自转轴在轨道面的迹象。由于不对称模型主要依赖非引力加速度的径向分量来产生彗星非引力运动的长期变化, 而对称模型则主要靠切向分量来产生长期变化, 因此不对称模型导出的热延滞角(thermal lag angles)一般小于由对称模型导出的延滞角。

以上讨论的是彗星的长期非引力效应, 处理方法一般是在彗星的运动方程中添加非引力项。特别是广泛应用的标准模型中, 把非引力项经验地表述为彗核 H_2O 冰蒸发率与非引力参数之积, 取冰蒸发率跟日彗距的很规律(连续)关系, 把非引力参数跟彗核自转联系起来。利用同一彗星的长期(三次以上回归)天体测量观测资料, 由运动方程解出轨道要素与非引力参数。然而, 许多彗星不仅显示连续的彗核冰蒸发, 而且常常偶然出现短时间的亮度突然增强——爆发并抛出更多物质, 还常伴有喷流^[23]。彗星爆发跟日彗距没有什么规律的关系^[24]。彗星爆发(尤其伴有喷流的)是否产生短时间的非引力效应? 显然, 这是探讨彗星性质与活动及非引力效应实质的有意义的新课题。一般说来, 彗星爆发产生的非引力效应不明显, 尚没有彗星爆发及其非引力效应的同时观测研究。

哈雷彗星 1985—1986 年回归期间, 国际联测(IHW)分别取得其爆发和天体测量的一批很好资料, 作为探索尝试, 我们哈雷彗星观测组, 选择 1985 年 11 月中旬和 12 月中旬的天体测量和三次伴有喷流的爆发资料进行研究。结果发现, 恰在三次爆发后, 观测的哈雷彗星赤经 α_0 和赤纬 δ_0 , 系统地偏离计算预报(已包括行星摄动改正)位置 α_c 和 δ_c , 偏差 α_{0-c} 或 δ_{0-c} 达 $2''$ 以上, 这超过可能的误差, 而其他时间 α_{0-c} 及 δ_{0-c} 基本上都在可能误差范围内(仅个别值较大)。归算出其相应日彗距变化(有的正、有的负)达几千公里, 地彗距变化(也有正、有负)也达几千公里。这一初步结果说明, 深入开展彗星的精密天体测量与爆发现象的同时观测、研究短期非引力效应的前景是好的, 有助于揭示非引力效应的物理本性、彗核的性质与活动状况。

最根本地, 彗星运动(包括非引力效应)研究的关键取决于天体测量资料的精度。彗星天

体测量的传统意义是用于推算轨道与历表；而近年来，彗星天体测量资料也直接用于揭示彗星的物理性质与过程，这就要求彗星天体测量有更高精度。实际上，彗星的非引力效应研究的主要困难就在于其天体测量资料(尤其以前的资料)精度不够好。当然，探索更合理的非引力加速度模型也是重要的，因为从同样的天体测量资料推算非引力参数各分量是跟模型有关的。就彗星天体测量而言，改进传统的照相定位方法及参考恒星精确位置，仍是必要和重要的，近年来提出彗星定位观测的一些改进建议^[5]，值得强调的是彗星定位观测的特殊困难或偏离，即由于彗星有往往不大对称的彗发，其光学中心与彗核质心有偏离。Yeomans等假定质心沿日彗向径对光心偏离，且大小(S)跟日彗距平方成反比^[23,26]， $S = S_0 r^{-2}$ ，把此偏离包括在解中，对哈雷彗星1835—1989年及1759—1989年资料得出 $S_0 = 880\text{km}$ 。Langraf假定此偏离正比于彗地距、反比于归化星等的平方根，得出 $S_0 = 3700\text{km}$ ^[21]。还不清楚哈雷彗星在过近日点后的观测偏差是由于质心-光心偏离、还是仪器效应。分析其1984—1986年的轨道残差后，Diaz-Zadunaisky指出，有轨道面法向的可能偏差分量，表明仅径向偏离模型可能不妥^[26]。因此，还不完全了解哈雷彗星轨道残差中的观测偏差。

目前彗星天体测量观测已达到 $1''$ 精度。空间望远镜及掩星观测可提高精度。哈雷彗星的飞船路径搜寻计划(Pathfinder Project)是成功的，Yeomans^[27]得出，包括路径搜寻观测的轨道解提供了飞船在1986年3月与哈雷彗星相遇的极好“局部”历表预报，但是，若不引进系统残差趋势，路径搜寻解不能表征从1835年到1986年的地面观测资料(在1835年和1910年接近地球时残差大到 $30''$ — $50''$)。对接近地球的彗星，用雷达观测可提供很有用的资料，尤其是传统光学天体测量观测史短的彗星^[28]，目前这种资料还很少。

参 考 文 献

- [1] Marsden, B. G., in *The Motion, Evolution of Orbits, and Origin of Comets*, ed. by G. A. Chebotarev et al., p. 135, (1972).
- [2] Brandt, J. C., and Chapman, R. D.(eds.), *Introduction to Comets*, p. 69, (1981).
- [3] Kiang, T., *M. N. R. A. S.*, 76 (1972), 27.
- [4] Whipple, F. L., *Ap. J.*, 111 (1950), 375.
- [5] Yeomans, D. K., in *Comets in the Post-Halley Era*, ed. by R. L. Newburn et al., Vol. 1, p.3, (1991).
- [6] Marsden, B. G., *A. J.*, 73 (1968), 367.
- [7] Marsden, B. G., *A. J.*, 74 (1969), 720.
- [8] Marsden, B. G., *A. J.*, 75 (1970), 75.
- [9] Marsden, B. G., Sekanina, Z. and Yeomans, D. K., *A. J.*, 78 (1973), 211.
- [10] Marsden, B. G., and Sekanina, Z., *A. J.*, 79 (1974), 413.
- [11] Marsden, B. G., in *Cometary Astrometry*, ed. by D. K. Yeomans et al., p. 163, JPL NASA, (1984).
- [12] Marsden, B. G., in *Dynamics of Comets*, ed. by A. Carusi and G. B. Valsechi, p. 343, (1985).
- [13] Yeomans, D. K., in *Cometary Astrometry*, ed. by A. Carusi and G. B. Valsechi, p. 167, (1984).
- [14] Sitarski, G., Ziolkowski, K., in *Exploration of Halley's Comet*, ESA SP-250, ed. by B. Battrick et al., V. II, p. 419, (1986).
- [15] Belton, M. J. S., in *Comets in Post-Halley Era*, ed. by R. L. Newburn et al., Vol. 2, p. 691, (1991).
- [16] Sitarski, G., *Acta Astronomica*, 34 (1984), 53.
- [17] Rickman, H. et al., *Astron. Astrophys.*, 188 (1987), 206.
- [18] Brady, J. L., Carpenter, E., *A. J.*, 72 (1971), 365.
- [19] Sitarski, G., *Acta Astronomica*, 31 (1981), 471.
- [20] Rickman, H., Froeschle, C., in *Cometary Exploration*, ed. by T. I. Gombosi, Vol. 3, p. 109, (1982).
Froeschle, C. and Rickman, H., *Astron. Astrophys.*, 170 (1986), 161.

- Froeschle, C. and Rickman, H., *Astron. Astrophys.*, 170 (1986), 145.
- [21] Landgraf, W., *Astron. Astrophys.*, 163 (1986), 367.
- [22] Yeomans, D. K. and Chodas, P. C., *A. J.*, 98 (1989), 1033.
- [23] Dobrovolsky, C. V. et al., in *Exploration of Halley's Comet*, ESA SP-250, V. III, p. 31, (1986).
- [24] Hughes, D. W., in *Comets in Post-Halley Era*, ed. by R. L. Newtun et al., Vol. 211, p. 825, (1991).
- [25] Yeomans, D. K. et al., in *Cometary Exploration*, ed. by T. I. Gombosi, Vol. 3, p. 95, (1982).
- [26] Diaz-Bobillo, I. J. and Zadunaisky, P. E., *Celestial Mechanics*, 42 (1988), 385.
- [27] Yeomans, D. K., in *Exploration of Halley's Comet*, ESA SP-250, Vol. II, p. 419, (1986).
- [28] Ostro, S. et al., *Icarus*, 78 (1989), 382.

(责任编辑 刘金铭)

Cometary Non-gravitational Effect

Hu Zhongwei

(Astronomy Department, Nanjing University, Nanjing 210008)

Yan Linshan

(Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030)

Abstract

Cometary accurate orbital motion is a complex and difficult problem. Its remarkable characteristic is the presence of the non-gravitational effect. In this paper, the progress of research concerned is reviewed. Firstly, discovery and explanation of the effect are summarized in brief. Then, standard non-gravitational acceleration models and their results are outlined. Finally, alternate non-gravitational models, some problems of short-term non-gravitational effect caused by cometary outburst and jet activity and the future prospect of this kind of studies are discussed.