力学与工程

——新时代工程技术发展与力学前沿研究

主编
徐　鉴　郭兴明

上海科学技术出版社

力学与工程

——新时代工程技术发展与力学前沿研究

主编　徐　鉴　郭兴明

上海科学技术出版社

内 容 提 要

本书的编辑和出版是为庆祝上海市力学学会成立 60 周年。为方便读者阅读，全书分为力学与航空航天、力学与先进制造、力学与先进材料、力学与城市建筑、力学与能源、力学与船舶海洋和力学与生物 7 部分。本书可作为高等院校力学专业和相关专业师生的参考书，也可供从事相关工程技术领域的科技人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

力学与工程：新时代工程技术发展与力学前沿研究 / 徐鉴，郭兴明主编. —上海：上海科学技术出版社，2019.5

ISBN 978-7-5478-4424-3

Ⅰ. ①力… Ⅱ. ①徐… ②郭… Ⅲ. ①应用力学—研究 Ⅳ. ①O39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 074924 号

力学与工程——新时代工程技术发展与力学前沿研究
主编 徐 鉴 郭兴明

上海世纪出版(集团)有限公司
上 海 科 学 技 术 出 版 社 出版、发行
(上海钦州南路 71 号 邮政编码 200235 www.sstp.cn)
上海锦佳印刷有限公司印刷
开本 787×1092 1/16 印张 31 插页 4
字数 750 千字
2019 年 5 月第 1 版 2019 年 5 月第 1 次印刷
ISBN 978-7-5478-4424-3/O・72
定价：240.00 元

编委会

主　编

徐　鉴　郭兴明

编　委（按姓氏笔画排序）

马　峥　叶国强　朱伟华　刘　桦　刘宇陆
杨爱玲　李向民　吴江斌　张俊乾　陈迎春
姚　伟　聂国隽　徐　鉴　郭兴明　唐　平
涂善东　龚　剑　熊　诚　薛雷平

校　对

吴慧玲

前 言

为庆祝和纪念上海市力学学会成立60周年，上海市力学学会第十二届理事会组织出版了《力学与工程——新时代工程技术发展与力学前沿研究》文集。文集中的论文由上海市力学界承担过国家级人才项目的学者和在工程技术领域工作的部分优秀工程师负责撰写。本文集秉承了上海市力学学会纪念文集的传统，是力学界前辈李国豪院士和何友声院士主编的庆祝上海市力学学会成立40周年文集《力学与工程——21世纪工程技术的发展对力学的挑战》的续本，也是刘桦教授和仲政教授主编的庆祝上海市力学学会成立50周年文集《力学与工程——21世纪工程技术的发展和力学前沿》的续本。本文集重点反映近10年来上海市力学工作者在力学前沿、航空航天、先进制造、先进材料、生命科学、城市建筑、船舶海洋等方面研究取得的科研成果。

在过去的10年中，力学学科发展呈现更加显著的“双力驱动”规律。上海力学工作者的研究既紧密围绕非线性、跨尺度等前沿问题展开，又涉及人类所面临的工程、健康、安全、能源、环境等重大问题，谋求实现两者的良性互动。力学现象的普遍性和力学研究方法的普适性，提供了力学与其他学科产生交叉的前提。力学不仅与航空航天、先进制造、先进材料、土木工程、船舶海洋等学科交叉，也产生了能源力学、生物力学、环境力学等新兴交叉学科。

在未来的10年中，创新是引领发展的第一动力，是建设现代化经济体系的战略支撑。力学是一门既经典又现代的学科，具有基础性和应用性。新时代的基础研究需要瞄准世界科技前沿，目标是实现前瞻性基础研究、引领性原创成果的重大突破。新时代的应用研究，需要以国家重大科技需求为牵引，突出关键共性技术、前沿引领技术、现代工程技术、颠覆性技术的创新。新时代科学研究前瞻性要求与技术创新需求为力学学科的发展提出了挑战，同时也为力学学科保持旺盛的生命力提供了新的动力。我们热切期望本文集的出版能得到上海乃至全国力学界及其相关工程技术领域科技人员的关注，加强互动和交流，继续传承上海力学界老一辈力学工作者的传统，并在新时代加以发扬光大，为实现中华民族的伟大复兴贡献力量。

徐　鉴　郭兴明

目　录

力学与航空航天

力学与先进制造

力学与先进材料

力学与城市建筑

力 学 与 能 源

力学与船舶海洋

力 学 与 生 物

力学与航空航天

三体问题周期解研究进展综述

廖世俊[1,2]　李晓明[1,3]　景益鹏[2]

(1. 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院，上海 200240；2. 上海交通大学物理和天文学院，上海 200240；3. 暨南大学力学与建筑工程学院，广州 510632)

摘　要：著名的三体问题可以追溯到17世纪80年代的牛顿时期。概述一般三体问题周期解的研究历程、最新进展以及简要介绍近期发现的2 000余个全新的周期解，涉及三体问题的解析周期解、三体问题的数值周期解、三体问题的广义开普勒第三定律以及广义相对论对三体问题周期解的影响。

关键词：三体问题；周期解；混沌

0　引　言

三体问题研究的是三个天体在相互之间的牛顿万有引力作用下的运动。三体问题可以追溯到17世纪80年代，牛顿[1]在《自然哲学的数学原理》一书中研究了三体问题，即太阳、地球和月球在相互之间的万有引力作用下的运动。三体问题作为经典的非线性动力学问题，其研究对非线性动力学的发展有着重要意义。三体问题的研究对恒星动力学和深空探测有重要的理论意义和工程价值。此外，庞加莱指出，三体问题的周期解是理解三体系统的一种重要途径。当一个天体的质量与其他两个天体质量相比小到可以忽略不计时，称为限制性三体问题(restricted three-body problem)。限制性三体问题中质量无限小的天体不影响有限质量体的运动，所以两个有限质量体为二体问题，其运动轨道为以质量重心为焦点的圆锥曲线，而一个无限小质量体在两体有限质量体的万有引力作用下运动。一般三体问题(general three-body problem)是指三体问题的三个天体都有显著的质量。三体问题通常是指一般三体问题。本文将简述一般三体问题周期解的研究历程和最新进展。

1　基本方程

三体问题的运动可以根据牛顿第二定律和万有引力定律给出：

$$\ddot{\boldsymbol{r}}_i = \sum_{j=1,\, j\neq i}^{3} \frac{G m_j (\boldsymbol{r}_j - \boldsymbol{r}_i)}{|\boldsymbol{r}_i - \boldsymbol{r}_j|^3}, \quad i=1,\ 2,\ 3 \tag{1}$$

式中，$\boldsymbol{r}_i$ 和 m_j 分别表示第 i 个和第 j 个天体的位置向量和质量 $(i,\ j=1,\ 2,\ 3)$；G 是牛顿引力常数。

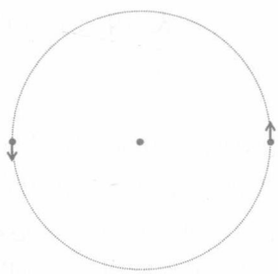
描述三体问题运动的一阶微分方程一共有18个，人们发现三体问题存在10个经典一阶积分，其中有3个动量积分、3个运动积分、3个动量矩积分和1个动能积分。所以18个一阶微分方程可以减少到8个一阶微分方程。Bruns[2]证明除了上述10个经典积分外，三体问题在笛卡尔坐标下的位置和动量没有新的积分。1887年，瑞典国王奥斯卡二世悬赏2 500克朗来征求“太阳系是稳定的吗”这个重要的天体力学问题的答案。庞加莱[3]把这个问题简化成三体问题，最终他提交的《关于三体问题的动力学方程》这一论文获得了悬赏。庞加莱[3]在研究三体问题中发现三体系统的运动形态非常

复杂以致没办法得到简单的答案，并且指出三体问题解的第一类积分不存在，因此没有一般性的解析解。庞加莱[4]还发现三体系统初始条件的微小差异会导致最终结果的巨大差异。这种对初始条件敏感现象的发现，开创了一个全新的研究领域——混沌。

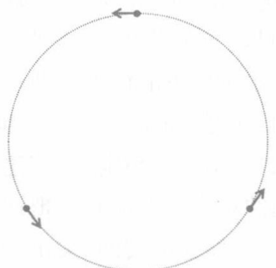
2 三体问题的解析周期解

欧拉[5]发现三体问题一类特别的周期解：三个天体始终保持在一条直线上并且绕着三个天体的质量中心做椭圆运动。如图`1a 所示，这类周期解特解的三个天体始终保持在一条直线上。但是欧拉发现的这类周期解是不稳定的，微小的扰动会最终使周期解不复存在。

同一时期，拉格朗日[6]发现三体问题的另一类周期解：三个天体分别做椭圆运动，三个天体构成的等边三角形会不断地扩张和旋转（图 1b）。无论三体系统的质量如何，系统总存在拉格朗日所发现的等边三角形构型的周期解。1906 年，天文学家在木星的轨道上首次发现了阿基里斯小行星，它和太阳、木星几乎构成等边三角形，这正是拉格朗日这类特解。



(a) 等质量情形的欧拉周期解



(b) 等质量情形的拉格朗日周期解

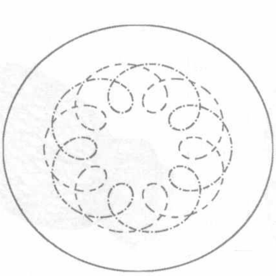
图 1 三体问题两种不同的解析周期解

3 三体问题的数值周期解

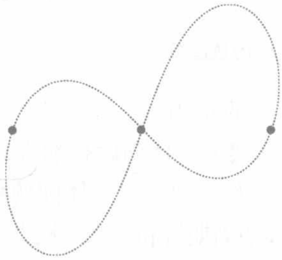
在 20 世纪初期，Burrau[7]采用数值方法研究了所谓的勾股构型三体问题（Pythagorean problem）。其中，三个天体的质量分别为 3、4、5，并且它们的初始位置落在边为 3、4、5 的直角三角形的顶点上。20 世纪 50 年代，关于一般三体问题是否存在周期解有一定的争议。Vernic[8]发表证明表示除了拉格朗日周期解外不存在其他周期解。但是 Merman[9]和 Leimanis[10]质疑 Vernic[8]的证明。Arenstorf[11]发表新的证明表明一般三体问题存在周期解，但是他并没有给出例子。20 世纪中叶之后，计算机的兴起和发展为三体问题周期解研究提供了新的途径。Szebehely 和 Peters[12]采用数值方法得到自由落体三体问题（free-fall three-body problem）存在两体碰撞的周期解。Standish[13]发现第一个三体问题非碰撞的周期解。这使人们确信三体问题存在除了拉格朗日解以外的周期解。

20 世纪 70 年代，采用数值方法寻找一般三体问题的周期解得到越来越多的关注。Broucke 和 Boggs[14]在固定的坐标系下得到平面一般三体问题的绝对周期解（absolute periodic solution），Broucke[15]在适当的旋转坐标系里得到平面一般三体问题的相对周期解（relative periodic solution），如图 2a 所示。采用数值延拓法（continuation method）把平面圆形限制性三体问题对称的周期解通过改变第三个天体的质量延拓到一般三体问题的周期解[16-17]。基于三体问题共线碰撞的周期解，可以通过旋转坐标系获得新的周期解[18-19]。Moore[20]采用数值方法发现了著名的 8 字形周期解，这类周期解重新被 Chenciner 和 Montgomery[21]发现（图 2b），并且被推广到旋转的情形[22-25]。

Montgomery[26]提出根据三体问题的周期轨道的拓扑性质来对三体问题周期解进行分类。根据拓扑分类方法，21 世纪之前发现三体问题周期解有三族[27]：① 拉格朗日-欧拉周期解[5-6]；② Broucke-Hadjidemetriou-Hénon（BHH）周期



(a) BHH型周期解



(b) 8字形周期解

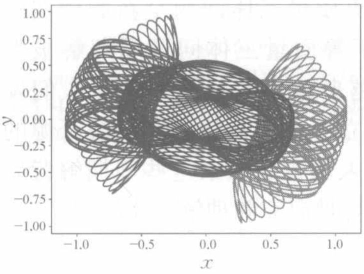
图 2 平面一般三体问题的周期解

解[14-19]；③ 8 字形周期解[20-21]。Šuvakov 和 Dmitrašinović[27]取得重大突破发现了等质量三体问题 13 个(属于 11 个不同的家族)全新的周期解。Hudomal[28]报道了 25 族周期解，其中包括 Šuvakov 和 Dmitrašinović[27]发现的 11 族周期解。

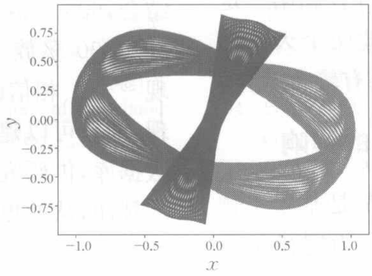
由于三体问题的混沌特性，廖世俊[29]提出干净数值模拟(clean numerical simulation，CNS)获取三体问题精准的轨道[30]。CNS 方法是基于任意高阶泰勒级数方法[31-33]和多精度计算[34]，并且通过与采用更小的数值噪声得到的数值结果对比来保证数值结果的收敛性和可靠性的数值策略。CNS 方法已成功应用到著名的 Lorenz 方程[29,35]、三体问题[30,36]、Rayleigh-Bénard 湍流[37]等研究中。采用网格搜寻方法、牛顿-拉夫森方法与 CNS 方法相结合，李晓明和廖世俊[38]获得等质量三体问题 695 族周期解，其中包括著名的 8 字形周期解和 Šuvakov 与 Dmitrašinović[27]发现的 11 族周期解，而有 600 多族周期解是全新的、未被报道过的。一些新的周期解的轨道图形如图 3 所示。需要强调的是，采用 CNS 方法比传统双精度的数值方法多发现了 243 族周期解。这充分表明了 CSN 方法的潜力，作为一种新的方法，CNS 方法带来了更多新的发现和认识。进一步地，李晓明、景益鹏和廖世俊[39]获得不等质量三体问题 1 200 多族全新的周期解。一些新的周期解的轨道图形如图 4 所示。

4 广义的开普勒第三定律

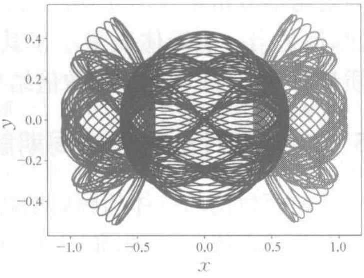
开普勒在研究太阳系的行星运动时发现了行星运动的三大定律。其中，开普勒第三定律是绕以太阳系为焦点做椭圆运动的行星，其半长轴的三次方与周期的平方之比是一个常数，即 $r_a^3 \propto T^2$，T 是周期，r_a 是周期轨道半长轴的长度。众所周知，开普勒定律适用于做椭圆运动的二体问题。对于三体系统，除了拉格朗日周期解是做椭圆运动，其他的周期解没有所谓的半长轴。Dmitrašinović 和 Šuvakov[40]指出可以通过平均势能和总能量的关系来定义三体系统的半长轴。三体系统中对应的半长轴和一个周期的平均势能相对应，即 $\dfrac{1}{R}=\dfrac{c}{T}\int_0^T V(r(t))\,\mathrm{d}t=\overline{U}$，所以 $\overline{R} \propto |\overline{U}|^{-1}$。因为三体系统的势能是坐标变量的齐次函数，并且三体系统的周期轨



(a) $\mathrm{I.A}_{77}^{\mathrm{i.c.}}$

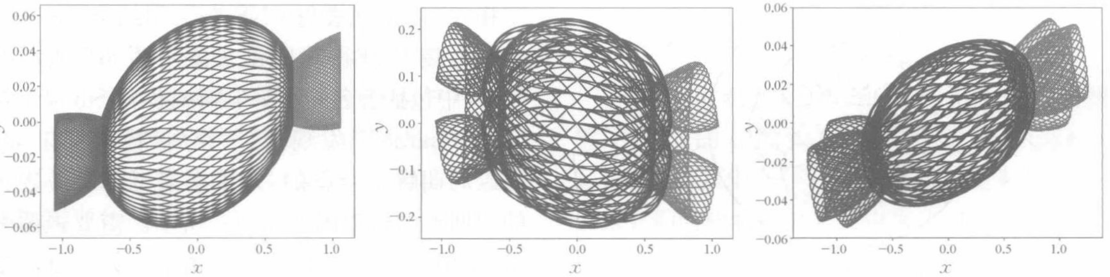


(b) $\mathrm{I.A}_{100}^{\mathrm{i.c.}}$



(c) $\mathrm{I.A}_{115}^{\mathrm{i.c.}}$

图 3 三个新发现等质量三体问题周期解[38]的轨道图



(a) $\mathrm{I.A}_{34}^{\mathrm{i.c.}}(0.5)$ (b) $\mathrm{I.A}_{68}^{\mathrm{i.c.}}(0.5)$ (c) $\mathrm{I.B}_{59}^{\mathrm{i.c.}}(0.75)$

图 4 三个新发现的不等质量三体问题周期解[39]的轨道图

道在有界的区域内运动，根据位力定理(virial theorem)[41]，其平均势能$\overline{U}$和平均动能$\overline{E_{\mathrm{k}}}$的关系为$2\,\overline{E_{\mathrm{k}}}=-\overline{U}$。因为三体系统的总能量$E=\overline{E_{\mathrm{k}}}+\overline{U}$，所以三体系统的平均势能$\overline{U}=2E$。由于三体系统的平均尺度$\overline{R}\propto|\overline{U}|^{-1}$，所以$\overline{R}\propto|E|^{-1}$。对于三体系统，采用平均尺度$\overline{R}$的定义，Dmitrašinović 和 Šuvakov[40]指出三体系统的开普勒第三定律$T\propto\overline{R}^{3/2}$，即$T\propto|E|^{-3/2}$，也就是说$T|E|^{3/2}=$常数。但是他们认为上式的右端项不是常数，它们依赖三体轨道的家族属性和系统的角动量[40]。李晓明和廖世俊[38]采用平均周期定义$\overline{T}=T/L_{\mathrm{f}}$，其中，$L_{\mathrm{f}}$是三体系统的周期轨道的自由群单元的长度，发现等质量的三体系统的 695 族周期轨道近似满足一个广义的开普勒第三定律：$\overline{R}\propto|E|^{-1}=0.56\,\overline{T}^{2/3}$。也就是说，对于这 695 族周期解，尺度不变的平均周期$\overline{T}^{*}=\overline{T}\,|E|^{3/2}$近似等于一个普适的常数$\overline{T}^{*}\approx2.433\pm0.075$。李晓明、景益鹏和廖世俊[39]发现，对于两个天体质量相等的三体问题周期解，尺度不变的平均周期随着第三个天体的质量线性变化。根据此数值结果，孙博华[42]通过量纲分析推导出n体问题的开普勒第三定律，但是当一个天体质量小于其他两个天体的质量时，该公式和此前的数值结果有较大差异。

5 广义相对论对三体周期解的影响

前面讨论的三体问题周期解都是基于牛顿万有引力定律的基础，但是牛顿引力定律是爱因斯坦广义相对论在低速下的近似。因此这里讨论牛顿三体问题周期解的广义相对论效应影响及其所产生的重力波。Imai 等[43]发现在广义相对论的框架下三体问题仍然存在 8 字形周期解。Torigoe 等[44]研究了三体问题拉格朗日型周期解、BHH 型周期解和 8 字形周期解的引力波形式。Dmitrašinović 等[45]计算了 Šuvakov 和 Dmitrašinović[27]发现的三体问题 13 个周期解的引力波形式和相应的光度，并且发现它们的光度在均值上相差 13 个量级。但是这些周期解是否有可能被引力波探测器探测到还有待进一步的研究。

6 结 语

本文简述了一般三体问题周期解的研究历程和最新进展。18 世纪，欧拉和拉格朗日分别发现一类解析的周期解，随后庞加莱[3]的研究证明三体问题不存在一般性的解析解，为三体问题周期解研究蒙上了阴影。直到 20 世纪中叶以后，随着计算机的兴起和发展，采用计算机相继发现了 Broucke - Hadjidemetriou - Hénon(BHH)周期解[14-19]、8 字形周期解[20-21]、Šuvakov 和 Dmitrašinović[27]发现的 13 个周期解。采用网格搜寻方法、牛顿-拉夫森方法与 CNS 方法相结合，600 多族等质量三体问题全新的周期解和 1 200 多族不等质量三体问题周期解被发现[38-39]。相信越来越多的周期解将被人们发现，期望可以建立一个三体问题周期解开源的数据库，供研究人员自由探索这些周期解背后的规律，从而更好地研究和理解三体问题。

参考文献

[1] Newton I. Philosophiae Naturalis Principia Mathematica

[M]. London: Royal Society Press, 1687.
[2] Bruns H. Über die integrale des vielkörper-problems [J]. Acta Mathematica, 1887, 11(1-4): 25-96.
[3] Poincaré H. Sur le probléme des trois corps et les équations de ladynamique. Divergence des séries de M Lindstedt[J]. Acta Math, 1890, 13: 1-270.
[4] Poincaré H. Chance[J]. The Monist, 1912, 22(1): 31-52.
[5] Euler L. De motu rectilineo trium corporum se mutuo attrahentium[J]. Novo Comm Acad Sci Imp Petrop, 1767, 11: 144-151.
[6] Lagrange J L. Essai sur le probleme des trois corps [J]. Prix de l'académie royale des Sciences de paris, 1772, 9: 292.
[7] Burrau C. Numerische Berechnung eines Spezialfalles des Dreikörperproblems[J]. Astronomische Nachrichten, 1913, 195(6): 113-118.
[8] Vernic R. Hrvatsko Prirod[J]. Drustvo Clas Mat Fiz Astron, 1953, Ser. 2, 8: 247-266.
[9] Merman G A. Qualitative research in the problem of three bodies[J]. Bull lnst Teoret Astr, 1958, 6: 687.
[10] Leimanis E, Minorsky N. Dynamics and Nonlinear Mechanics[M]. New York: Wiley and Sons, 1958: 55-80.
[11] Arenstorf R F, Hale J K, Lasalle J P. Differential Equations and Dynamical Problems[M]. New York: Academic Press, 1967: 55-68.
[12] Szebehely V, Peters C F. A new periodic solution of the problem of three bodies[J]. The Astronomical Journal, 1967, 72: 1187.
[13] Giacaglia S E. Periodic Orbits, Stability and Resonances[M]. Netherlands: Springer, 1970.
[14] Broucke R, Boggs D. Periodic orbits in the Planar General Three-Body Problem[J]. Celestial mechanics, 1975, 11(1): 13-38.
[15] Broucke R. On relative periodic solutions of the planar general three-body problem[J]. Celestial mechanics, 1975, 12(4): 439-462.
[16] Hadjidemetriou J D. The continuation of periodic orbits from the restricted to the general three-body problem[J]. Celestial mechanics, 1975, 12(2): 155-174.
[17] Hadjidemetriou J D, Christides T. Families of periodic orbits in the planar three-body problem[J]. Celestial mechanics, 1975, 12(2): 175-187.
[18] Hénon M. A family of periodic solutions of the planar three-body problem, and their stability[J]. Celestial mechanics, 1976, 13(3): 267-285.
[19] Hénon M. Stability of interplay motions[J]. Celestial mechanics, 1977, 15(2): 243-261.
[20] Moore C. Braids in classical dynamics[J]. Physical Review Letter, 1993, 70: 3675-3679.
[21] Chenciner A, Montgomery R. A Remarkable Periodic Solution of the Three-Body Problem in the Case of Equal Masses[J]. Annals of Mathematics, 2000, 152 (3): 881-901.
[22] Nauenberg M. Periodic orbits for three particles with finite angular momentum [J]. Physics Letters A, 2001, 292: 93-99.
[23] Nauenberg M. Continuity and stability of families of figure eight orbits with finite angular momentum [J]. Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy, 2007, 97(1): 1-15.
[24] Chenciner A, Féjoz J, Montgomery R. Rotating Eights: I. The three Γi families[J]. Nonlinearity, 2005, 18(3): 1407-1424.
[25] Broucke R, Elipe A, Riaguas A. On the figure-8 periodic solutions in the three-body problem [J]. Chaos, Solitons & Fractals, 2006, 30(3): 513-520.
[26] Montgomery R. The N-body problem, the braid group, and action-minimizing periodic solutions [J]. Nonlinearity, 1998, 11(2): 363.
[27] Šuvakov M., Dmitrašinović V. Three Classes of Newtonian Three-Body Planar Periodic Orbits [J]. Physical Review Letter, 2013, 110: 114301.
[28] Hudomal A. New periodic solutions to the three-body problem and gravitational waves [D]. Serbia: University of Belgrade, 2015.
[29] Liao S J. On the reliability of computed chaotic solutions of non-linear differential equations[J]. Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography, 2008, 61(4): 550-564.
[30] Liao S J. Physical limit of prediction for chaotic motion of three-body problem [J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2014, 19(3): 601-616.
[31] Barton D, Willers I M, Zahar R V M. The automatic solution of systems of ordinary differential equations by the method of Taylor series[J]. The Computer Journal, 1971, 14(3): 243-248.
[32] Corliss G, Chang Y F. Solving ordinary differential equations using Taylor series[J]. ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS), 1982, 8(2): 114-144.
[33] Barrio R, Blesa F, Lara M. VSVO formulation of the Taylor method for the numerical solution of ODEs [J]. Computers & mathematics with Applications, 2005, 50(1-2): 93-111.
[34] Portilho O. MP - A multiple precision package [J]. Computer Physics Communications, 1990, 59: 345-358.
[35] Liao S J, Wang P F. On the mathematically reliable long-term simulation of chaotic solutions of Lorenz equation in the interval [0, 10000][J]. Science China Physics, Mechanics and Astronomy, 2014, 57(2): 330-335.
[36] Liao S J, Li X M. On the inherent self-excited

macroscopic randomness of chaotic three-body systems [J]. Int. J. Bifurcation & Chaos, 2015, 25: 1530023.

[37] Lin Z L, Wang L P, Liao S J. On the origin of intrinsic randomness of Rayleigh-Bénard turbulence [J]. Sci China - Phys Mech Astron, 2017, 60(1): 014712.

[38] Li X M, Liao S J. More than six hundred new families of Newtonian periodic planar collisionless three-body orbits [J]. Science China Physics, Mechanics & Astronomy, 2017, 60(12): 129511.

[39] Li X M, Jing Y P, Liao S J. Over a thousand new periodic orbits of a planar three-body system with unequal masses[J]. Publications of the Astronomical Society of Japan, 2018, 70(4).

[40] Dmitrašinović V, Šuvakov M. Topological dependence of Kepler's third law for collisionless periodic three-body orbits with vanishing angular momentum and equal masses[J]. Physics Letters A, 2015, 379(36): 1939 - 1945.

[41] Landau L, Lifshitz E. Mechanics[M]. 3rd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1976.

[42] Sun B H. Kepler's third law of n-body periodic orbits in a Newtonian gravitation field[J]. SCIENCE CHINA Physics, Mechanics & Astronomy, 2018, 61(5): 054721.

[43] Imai T, Chiba T, Asada H. Choreographic solution to the general-relativistic three-body problem [J]. Physical review letters, 2007, 98(20): 201102.

[44] Torigoe Y, Hattori K, Asada H. Gravitational wave forms for two and three-body gravitating systems [J]. Physical review letters, 2009, 102(25): 251101.

[45] Dmitrašinović V, Šuvakov M, Hudoma A. Gravitational waves from periodic three-body systems[J]. Physical review letters, 2014, 113(10): 101102.

运载火箭设计中的几类关键力学问题研究进展

唐　平　毛玉明　刘锦凡　刘玉玺　王吉飞

（上海宇航系统工程研究所，上海 201108）

摘　要： 中国长征系列运载火箭经过半个多世纪的发展，现役运载火箭由早期的多年一次发射任务发展到了一年接近 40 次的高密度发射；同时，新一代液氧煤油绿色推进运载火箭实现了成功首飞。航天工程力学问题研究在运载火箭的研制过程中起到了举足轻重的作用。其中，气动外形设计是火箭性能优化设计的基础，POGO 稳定性设计是运载火箭纵向振动稳定性分析的关键，动力学与控制是确保运载火箭姿态稳定的核心技术，载荷环境设计是火箭结构设计和单机设计的重要因素。这些技术是运载火箭总体设计的核心技术。主要针对运载火箭的气动设计、POGO 稳定性分析、动力学与控制、载荷环境设计等关键力学技术进行综述，介绍各技术的工程背景、发展历程，以及国内技术单位取得的相应技术成果，并对后续的发展进行了展望。

关键词： 运载火箭；POGO；气动设计；姿态控制；载荷设计；环境设计

0　引　言

中国航天经过半个多世纪的发展，运载火箭实现了 CZ－5、CZ－6、CZ－7 等新一代绿色推进剂运载火箭成功首飞，载人登月工程顺利实现了月球探测器背面着陆，完成了绕、落、回三部曲中的前两步，以通信导航为代表的空间民用基础设计初步建设完成。通过重大航天工程的实施，国内航天工程取得了一系列的重大成果，为保障国家安全、有效应对国际竞争和全球化挑战发挥了重要的作用。

在《国家民用空间基础设施中长期发展规划（2015—2025 年）》中明确，要逐步建成技术先进、自主可控、布局合理、全球覆盖，由卫星遥感、卫星通信广播、卫星导航定位三大系统构成的国家民用空间基础设施，满足行业和区域重大应用需求，以及我国现代化建设、国家安全和民生改善的发展要求。在“十三五”期间，要构建形成卫星遥感、卫星通信广播、卫星导航定位三大系统，基本建成国家民用空间基础设施体系，提供连续稳定的业务服务；数据共享服务机制基本完善，标准规范体系基本配套，商业化发展模式基本形成，具备国际服务能力。要实现上述目标，运载火箭的研制和发展是航天工程实施的基础，国内新一代运载火箭有更高的总体设计水平，具有更大的运载能力，满足更高的可靠性技术指标，火箭设计逐步向大型化、轻量化、低成本、高可靠等方面发展。而运载火箭总体设计中的关键力学技术，如气动设计、POGO 稳定性分析、动力学建模与控制、载荷环境设计等，一直作为运载火箭总体设计的核心关键技术，在型号研制过程中加以重视。下面对上述关键技术在运载火箭研制过程中的工程来源、发展历程、工程应用等方面进行综述。

1　运载火箭气动设计技术研究进展

气动特性是运载火箭总体设计、弹道计算、控制稳定系统设计和结构载荷计算的基础[1-3]。运

载火箭飞行的特点是：飞行速度由零增加到高超声速，中间经历了低速（$Ma<0.3$）、亚声速（$0.3\leqslant Ma<0.75$）、跨声速（$0.75\leqslant Ma<1.2$）、超声速（$1.2\leqslant Ma<5$）和高超声速（$Ma\geqslant 5$）等各速度阶段。在不同速度范围气流流动特性不一样，相应气动特性变化规律也不同；与此同时，飞行高度也从地面上升到外层空间，飞行雷诺数不断变化，影响着火箭的气动力；火箭在大气层中飞行时，其飞行姿态不断改变，包括攻角、滚转角和各角速度等都影响着火箭的气动特性。

获取运载火箭气动特性数据的主要方法有工程计算、风洞试验和数值仿真，三者相互补充、有机结合[1-3]。工程计算主要是采用理论与经验相结合的部件组合工程算法[4]，该方法可较快地得到气动特性数据，但精度较差，适用于方案选型阶段的气动设计。风洞试验可以获得较为准确的气动特性数据[5]，但其高耗时、高花费和低效率一直以来是气动设计必须面对的事实，这极大地制约了型号研制工作的进展。随着计算机及数值仿真技术的飞速发展，基于计算流体力学(CFD)的数值仿真方法在运载火箭气动设计中发挥着越来越重要的作用，众多CFD软件均能对运载火箭气动参数做出较为准确的模拟[6-7]。CFD数值仿真方法不仅具有成本低、效率高和模拟复杂问题强等优点，还能提供丰富的流场信息，使设计人员能更好地从气动机理上分析研究运载火箭的气动特性。经过考核的CFD软件和模型可以应用于实际工程设计，优化试验规模，节约昂贵的试验和时间。经过航天工业多年的发展，国内外已形成了较为成熟的风洞群以及相关的风洞试验技术和规范[5]。相对而言，数值仿真技术还在不断进步和完善中，在运载火箭设计中的运用也在不断深入，因此主要关注数值仿真方法在运载火箭气动设计中的研究进展。

数值仿真方法在运载火箭气动设计中的运用日趋广泛。如NASA开发了CFD数值仿真软件包TetrUSS（包括GridTool、VGRID、USM3D等软件），用于Ares Ⅰ、Ares Ⅰ-Ⅹ以及Ares Ⅴ等运载火箭的气动设计[8]；欧洲太空局在Vega火箭设计中大量运用了CFD仿真技术[9]；中国运载火箭技术研究院在火箭设计和改型中也广泛采用了数值仿真技术[1-2]；上海航天技术研究院近年来也不断研究CFD数值仿真技术，并成功运用于成熟运载型号的改型设计以及新一代运载火箭的预研设计中。目前，国内外在一般构型运载火箭定常气动特性数值仿真方面已逐渐成熟，还需要在复杂外形气动仿真精度提高、气动精细化设计等方面进一步开展工作。对于非定常气动特性数值仿真，国内外均处于开发、验证阶段，包括跨声速脉动压力引起的动载荷(脉动压力问题)、跨声速非定常气动力引起弹性箭体的结构稳定性问题(气动阻尼问题)，以及火箭在发射场竖立状态下的风激振动问题(竖立风载问题)等。

1.1 气动分布载荷精细化设计研究

气动力分布载荷以前是采用部段组合法进行计算[4]。全箭气动力由部段气动力和部段间相互干扰力组成。部段气动力可以通过理论或风洞试验获取，一般有较为固定的表达式。部段间的相互干扰力难以计算，因为部段间的干扰力是由多个部段相互耦合作用的结果，很难用统一的方程来描述。在以往的设计中，一般通过经验公式来计算。经验公式有较多的变量参数，需要大量类似构型飞行器的风洞试验数据支撑。而对于新研构型的火箭，没有大量风洞试验数据支撑，更无经验公式可循。工程算法很难给出精确值，只能通过放大余量来进行保守设计。采用CFD数值仿真方法进行运载火箭气动设计后，基于离散箭体表面气动力沿轴向积分的方法开始应用于分布载荷精细化设计。NASA在CFD数值仿真软件包TetrUSS中开发了气动分布载荷精细化设计模块，用于Ares Ⅰ、Ares Ⅰ-Ⅹ以及Ares Ⅴ等运载火箭的气动设计[8]。采用类似方法，国内各运载火箭设计院均开展了气动分布载荷精细化设计。该精细化设计方法基于CFD数值仿真方法，在气动外形模拟方面可以模拟电缆整流罩、反推火箭、级间分离插头等凸起物，提供较为准确的气