考虑间隙的新能源汽车电机回转特性仿真研究*

郑鑫[1]　衣杰[2]

（1.安徽水利水电职业技术学院，合肥 231603；2.山东建筑大学机电工程学院，济南 250101）

【欢迎引用】郑鑫，衣杰．考虑间隙的新能源汽车电机回转特性仿真研究[J]. 汽车文摘，2026(6): 58-62.

【Cite this paper】ZHENG X, YI J. Simulation Study on the Rotation Characteristics of New Energy Vehicle Motor Considering Clearance[J]. Automotive Digest (Chinese), 2026(6): 58-62.

【摘要】针对制造、装配工艺等原因，使电机产品出现不可避免的尺寸间隙问题，基于第二类拉格朗日方程，结合Lankarani-Nikravesh模型和Hertz理论，建立了考虑间隙的新能源汽车电机数学模型。随后，基于ADAMS建立有限元仿真模型，并通过Newmark积分法进行时间历程积分，针对不同类型的结构间隙对输出回转特性进行分析统计，并阐明了间隙类型以及间隙大小对电机动力特性的影响，为新能源汽车电机参数的设计改良提供了理论支持。

关键词：新能源汽车电机；回转特性；间隙；数学模型；有限元仿真

中图分类号：U469.7　　**文献标志码：**A　　**DOI:** 10.19822/j.cnki.1671-6329.20240285

Simulation Study on the Rotation Characteristics of New Energy Vehicle Motor Considering Clearance

Zheng Xin[1], Yi Jie[2]

（1. Anhui Technical College of Water Resources and Hydroelectric Power, Hefei 231603; School of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101）

【Abstract】To address unavoidable dimensional clearance issues in motor products caused by manufacturing and assembly processes, a mathematical model for new energy vehicle motors considering clearance is established based on the second kind of Lagrange equation, incorporating the Lankarani-Nikravesh model and Hertz theory. Subsequently, a finite element simulation model is developed in ADAMS, and time history integration is performed using the Newmark integration method. The analysis statistically evaluates the effects of different types of structural clearance on the output rotational characteristics. The influence of clearance types and magnitudes on the dynamic performance of the motor is elucidated, providing theoretical support for the design improvement of new energy vehicle motor parameters.

Key words: New energy vehicle motor, Rotation characteristic, Clearance, Mathematical model, Finite element simulation

0　引言

新能源汽车的电驱动系统是车辆动力性能的关键组成部分，其核心组件为电机[1]。随着新能源汽车市场的迅速发展，电机控制精度的需求日益提高。电机的回转特性直接影响车辆的动力性、能效与驾驶平顺性[3]。Feng等[4]结合解析模型与有限元模型，研究了电机转子动态偏心对齿槽转矩合定子损耗的影响，研究发现偏心会导致转矩降低，使定子铜芯损耗显著增大。Qian等[5]基于稳健设计方法，提出了一种考虑磁体制造公差和转子偏心的电机齿槽转矩近似解解法，并考虑偏心磁体与齿槽的空间位置关系构建了有限元预测模型。左曙光等[6]构建的三维动态尺寸偏心有限元模型研究表明，当电机低阶力波幅值和不平衡磁拉力幅值成线性关系时，电机的电磁振动将会加剧。陈俭[7]基于麦克斯韦张量法与有限元法，针对其所设计的高速V型内置式永磁同步电机展开了配合间隙对电机运动特性的影响分析，

*基金项目：安徽省高等学校自然科学研究项目（2022AH052289），安徽省高校学科（专业）拔尖人才学术资助项目（gxbjZD2021122）。

并通过田口-响应曲面法进行了合理性设计参数优化。正是由于电机的实际工况与理想条件下的运动状态之间存在差异，尤其是在考虑机械间隙时，电机的回转特性将发生显著变化[8]。因此，针对电机回转副的间隙问题开展研究，建立更为精确的数学模型，以实现对电机的精确控制，具有重要的理论价值与工程价值。

现有的研究多集中于理想工况下的电机回转特性，而对实际制造与装配工艺产生间隙的影响研究相对较少。本文通过引入第二类拉格朗日方程、Lankarani-Nikravesh模型以及赫兹(Hertz)理论，建立了考虑间隙的新能源汽车电机回转特性数学模型，并结合有限元仿真与数值积分方法，分析了间隙对电机性能的影响。

1 模型构建

1.1 第二类拉格朗日方程

拉格朗日方程是经典力学中处理多体系统动力学的基本方法之一。第二类拉格朗日方程基于广义坐标系，通过势能和动能的差值构建系统的运动方程，此方程能够有效描述电机系统的回转运动，其表达式为[9]：

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}\right)-\frac{\partial L}{\partial q_i}=Q_i \tag{1}$$

式中：L为拉格朗日量，是系统的动能T与势能V之差；q_i为广义坐标；$\dot{q}_i$为广义速度；Q_i为广义力。

1.2 Lankarani-Nikravesh模型

Lankarani-Nikravesh模型是一种常用于碰撞分析的接触模型，能够有效描述变形体之间的接触行为以及变形特征随时间变化的关系。该模型基于Hertz接触理论，并通过引入能量耗散项描述碰撞过程中能量的损失，其接触力表达式为[10]：

$$F=k\delta^{n}+c\delta^{n}\dot{\delta} \tag{2}$$

式中：k为接触刚度，δ为接触变形量，n为接触力指数(通常取1.5，适用于Hertz接触理论)，c为阻尼系数，$\dot{\delta}$为接触变形的变化率。

接触刚度k与阻尼系数c的表达式为[11]：

$$\begin{cases} k=\dfrac{4\sqrt{\dfrac{R_1R_2}{(R_1+R_2)}}}{3\pi\left(\dfrac{1-v_1^{\,2}}{E_1}+\dfrac{1-v_2^{\,2}}{E_2}\right)} \\ c=0.75\dfrac{(1-p^2)k\delta^{1.5}}{v_0} \end{cases} \tag{3}$$

式中：R_1、R_2分别为变形体接触半径，δ为接触点法向变形量，E_1、v_1、E_2、v_2分别为变形体1、2的杨氏模量与泊松比，p为弹性回复系数，v_0为冲击速度。

1.3 Hertz理论

Hertz接触理论通常被用于描述两物体接触变形和接触压力分布的弹性接触行为[12]。根据Hertz理论，2个弹性体在接触时的变形量与接触力呈非线性关系，考虑普适情况的Hertz接触系数A、B表达式为：

$$2(B+A)=\frac{1}{R_{11}}+\frac{1}{R_{12}}+\frac{1}{R_{21}}+\frac{1}{R_{22}} \tag{4}$$

$$2(B-A)=\left[\left(\frac{1}{R_{11}}-\frac{1}{R_{12}}\right)^2+\left(\frac{1}{R_{21}}-\frac{1}{R_{22}}\right)^2+2\left(\frac{1}{R_{11}}-\frac{1}{R_{12}}\right)\left(\frac{1}{R_{21}}-\frac{1}{R_{22}}\right)\cos 2\psi\right]^{\frac{1}{2}} \tag{5}$$

式中：$\frac{1}{R_{11}}$、$\frac{1}{R_{12}}$与$\frac{1}{R_{21}}$、$\frac{1}{R_{22}}$分别为弹性体1、2沿接触切面及其法向的主曲率半径，ψ为法平面夹角。

根据Hertz接触理论，接触区域可被视作椭圆接触域，系数A和B与接触椭圆偏心率e之间的关系为：

$$\frac{A}{B}=(1-e^2)\frac{K(e)-E(e)}{E(e)-(1-e^2)K(e)} \tag{6}$$

$$e^2=1-\left(\frac{b_e}{a_e}\right)^2 \tag{7}$$

式中：a_e、b_e分别为接触椭圆的长半轴和短半轴，$K(e)$、$E(e)$分别为以Φ为积分变量的第一、二类完整椭圆积分，表达式为：

$$K(e)=\int_0^{\frac{\pi}{2}}\frac{\mathrm{d}\Phi}{\sqrt{1-e^2\sin^2\Phi}} \tag{8}$$

$$E(e)=\int_0^{\frac{\pi}{2}}\sqrt{1-e^2\sin^2\Phi}\,\mathrm{d}\Phi \tag{9}$$

根据接触椭圆偏心率及第一、二类完整椭圆积分，接触椭圆长、短半轴分别为：

$$\begin{cases} a_e=m\left[\dfrac{3\pi P(\delta_1+\delta_2)}{4(A+B)}\right]^{\frac{1}{3}} \\ b_e=n\left[\dfrac{3\pi P(\delta_1+\delta_2)}{4(A+B)}\right]^{\frac{1}{3}} \end{cases} \tag{10}$$

式中：a_e、b_e为接触椭圆长半轴和短半轴，P为法向压力，$m=\left[\frac{2E(e)}{\pi(1-e^2)}\right]$，$n=\left[\frac{2E(e)}{\pi}\right]^{\frac{1}{3}}(1-e^2)^{\frac{1}{6}}$，$\delta_1=\frac{1-v_1^{\,2}}{\pi E_1}$，$\delta_2=\frac{1-v_2^{\,2}}{\pi E_2}$。

由于弹性接触带来的接触变形与法向载荷之间的关系为：

$$P = K_{nr}\delta^{\frac{3}{2}} \tag{11}$$

式中：K_{nr}为Hertz接触计算系数，可由式(12)和式(13)确定：

$$K_{nr} = \frac{4}{3}\frac{q_k}{(\delta_1 + \delta_2)\sqrt{A + B}} \tag{12}$$

$$qk = \sqrt{\pi}\ [m/2K(e)]^{\frac{3}{2}} \tag{13}$$

2 基于ADAMS的有限元仿真

2.1 有限元模型构建

为了更好地模拟电机回转副的实际工况，本文基于ADAMS构建了考虑间隙的新能源汽车电机回转特性有限元仿真模型，如图1所示。该模型包括电机转子、定子以及回转副的接触模型，能够模拟电机在实际运行过程中不同间隙条件下的回转运动。

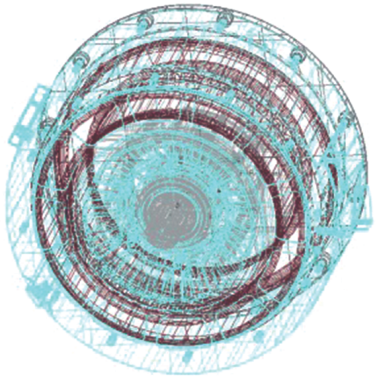


图1 基于ADAMS的永磁同步电机建模

在模型中，关键的输入参数包括电机的基本参数、几何参数、材料参数以及电气参数等如表1所示。同时，模型中采用Lankarani-Nikravesh接触模型描述回转副中的接触行为，并通过Hertz理论计算接触变形与接触力。

表1 电机参数

参数类型	数值
额定电压/V	310
额定电流/A	15
极对数/	3
定子内径/m	0.2
转子外径/m	0.18
定子槽数/个	48
定子铁心材料	硅钢片
转子磁体材料	钕铁硼
定子绕组材料	铜
定子电感/H	0.05
定子电阻/Ω	0.3

2.2 Newmark积分法

本文采用了Newmark积分法[13]对所构建的有限元模型进行基于时间历程增量积分的求解方法。Newmark积分法是一种常用于结构动力学中的数值积分方法，具有较好的稳定性和精度，尤其适用于非线性动力学问题。回转零部件六自由度表达式为：

$$\boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{x}} + C\dot{\boldsymbol{x}} + \boldsymbol{K}\boldsymbol{x} = F(t) \tag{14}$$

式中：$\boldsymbol{M}$为回转体的质量矩阵，C为阻尼，$\boldsymbol{K}$为刚度矩阵，$\boldsymbol{x}$为六自由度位移向量，t为时间。

当t时刻的位移量确定时，则$t+\Delta t$时刻的速度及位置信息可以通过式(15)和式(16)确定：

$$\dot{\boldsymbol{x}}_{t+\Delta t} = \dot{\boldsymbol{x}}_t + [(1-\gamma)\ddot{\boldsymbol{x}}_t + \gamma\ddot{\boldsymbol{x}}_{t+\Delta t}]\Delta t \tag{15}$$

$$\boldsymbol{x}_{t+\Delta t} = \boldsymbol{x}_t + \dot{\boldsymbol{x}}_t\Delta t + [(\frac{1}{2}-\beta)\ddot{\boldsymbol{x}}_t + \beta\ddot{\boldsymbol{x}}_{t+\Delta t}]\Delta t^2 \tag{16}$$

式中：β和γ为控制算法精度和稳定性的参数，取值在区间[0,1]内。

当$\gamma \geq 1/2$且$\beta \leq 1/2$时，Newmark算法稳定收敛的充分必要条件为积分的时间增量须满足[14]：

$$\Delta t \leq \frac{1}{\omega_n\sqrt{\frac{1}{2}\gamma - \beta}} \tag{17}$$

式中：ω_n为回转体的固有频率。当$2\beta \geq \gamma \geq 1/2$时，Newmark算法具有无条件稳定性，因此此处取β为0.25，γ为0.5。

基于上述Newmark积分法的参数取值与递推规则，电机回转体动力学方程的增量步求解流程如下：(1)对$t+\Delta t$时刻的回转体六自由度动力学控制方程进行等效变形，整理为以该时刻位移向量为核心求解目标的标准形式；(2)将变形后的动力学控制方程与Newmark积分法速度递推公式联立，把$t+\Delta t$时刻的未知加速度向量转化为由t时刻已知运动参数、算法稳定参数与待求位移向量构成的关联形式，消去加速度未知量；(3)将加速度-位移关联式与位移递推公式代入$t+\Delta t$时刻的动力学控制方程，整理得到以该时刻位移为唯一未知量的线性方程组，求解该方程组后反向代入相关公式得到对应时刻的速度与加速度，完成单个时间步的动力学响应计算。

循环迭代该流程即可完成电机全运行时间历程的动力学积分，获取不同间隙条件下电机回转体的实时运动参数，为后续间隙对电机回转特性的影响分析提供数值计算基础。

2.3 基于仿真环境的因子试验设计

为了更系统地研究不同位置和大小的间隙对电机回转特性的影响，本文设计了基于有限元仿真环境

的因子试验。因子试验设计是一种多因素试验设计方法，能够同时研究多个因素及其交互作用对系统性能的影响。在本研究中，选择了2个关键因素：间隙的位置和间隙的大小，并对这些因素进行多水平设计，分析其对电机回转特性的影响。

电机回转副中的间隙可能出现在不同的位置，例如轴承与转子之间、转子与定子之间等。为了简化分析，将间隙位置分为2个主要因素：转子-轴承间隙(A_1)与转子-定子间隙(A_2)。另外，间隙大小直接影响接触力和系统的动力学行为。为了研究不同间隙大小的影响，选择3个不同的间隙尺寸作为试验因子：小间隙-0.1 mm(B_1)、中间隙-0.5 mm(B_2)以及大间隙-1.0 mm(B_3)。根据因子与水平的选择，设计的因子试验如表2所示。

表2　试验因子设计

因子组合	间隙位置(A)	间隙大小(B)
A_1B_1	转子-轴承间隙	小间隙(0.1 mm)
A_1B_2	转子-轴承间隙	中间隙(0.5 mm)
A_1B_3	转子-轴承间隙	大间隙(1.0 mm)
A_2B_1	转子-定子间隙	小间隙(0.1 mm)
A_2B_2	转子-定子间隙	中间隙(0.5 mm)
A_2B_3	转子-定子间隙	大间隙(1.0 mm)

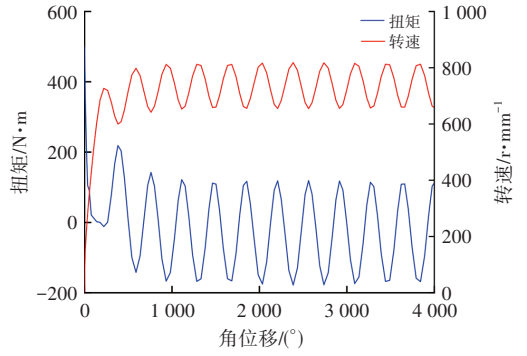
该设计共包含6个试验组合，每个组合通过有限元仿真进行分析。

2.4　仿真结果与分析

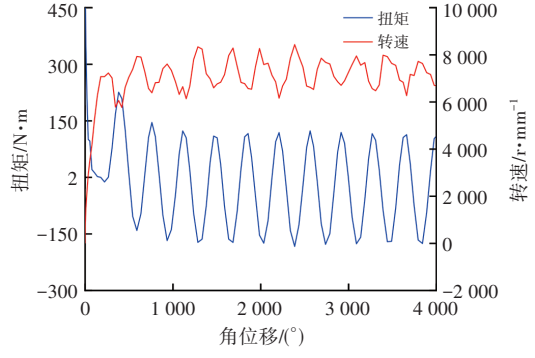
通过有限元仿真，获得了不同位置和不同大小的电机间隙对新能源汽车动力特性的影响。图2展示了经因子试验获取的转速、扭矩仿真结果，从图2a~图2c转子-轴承间隙，以及图2d~图2f转子-定子间隙间隙增大可知，仿真环境中的电机输出发生了不同程度的波动，这一现象在转速指标上表现的尤为明显。

当2类间隙值均为0.1 mm时，转速输出稳定的简谐波动，以约450 N·m为波动中心平稳变换；当间隙量增大至0.5 mm时，转速曲线的波峰、波谷处出现较为尖锐的奇异点。据此可以推测，间隙的存在使得转子在回转运动过程中受到了偏心作用，与定子、轴承发生冲击碰撞，过程中电机输出失稳；当间隙量持续增大至1 mm时，径向偏心回转运动加剧，冲击碰撞逐渐趋于稳定，非波峰波谷处的转速曲线上也出现了大量噪声点。

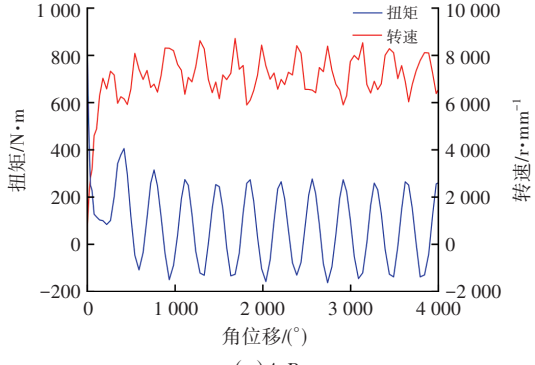
为了更加直观地展示上述因子变量变化对的电机输出扭矩以及转速的影响，以A_1B_1组的仿真结果作为基准，统计了角位移历程点数据相较于A_1B_1组的极限偏差情况，该统计结果如图3所示。浮动柱状图中从左到右分别为第2组到第6组相较于第1组的偏差。其中最小的为第4组，扭矩与转速相较于第1组的偏差区间分别为-1.05%~2.34%、-2.15%~3.97%，最大第6组偏差区间为-16.32%~9.06%、-18.48%~15.13%。



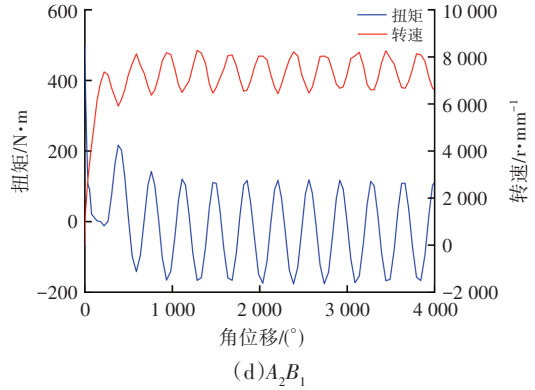
(a)A_1B_1



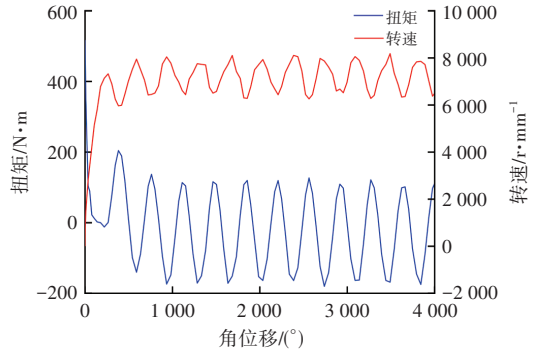
(b)A_1B_2



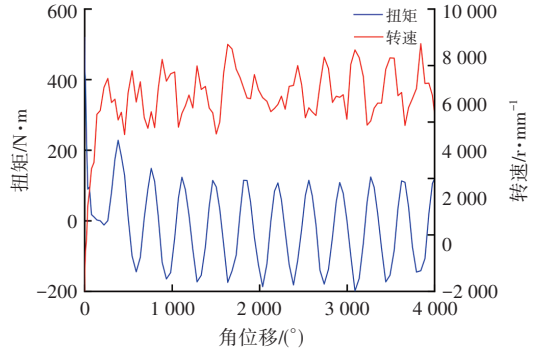
(c)A_1B_3



(d)A_2B_1



(e)A_2B_2



(f)A_2B_3

图2　因子试验转速、扭矩仿真结果

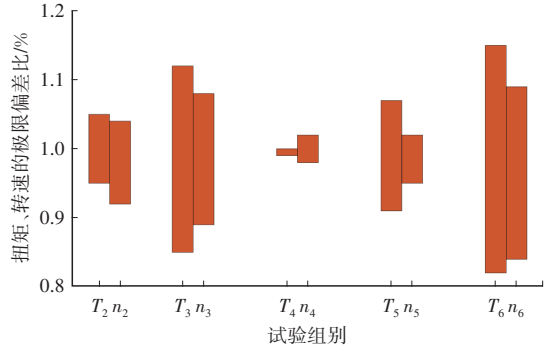


图3　扭矩、转速偏差比

3　结束语

本文通过理论建模与仿真分析研究了间隙对电机回转特性的影响。基于第二类拉格朗日方程、Lankarani-Nikravesh模型以及Hertz理论，建立了能够反映电机回转副运动模型，基于ADAMS进行了考虑间隙的电机模型进行仿真并设计因子试验，通过Newmark积分法进行求解，并分析了不同间隙条件对电机动力学特性的影响。研究结果表明，较大的间隙会显著降低电机的运行平稳性。因此，在实际工程中，应尽可能减小回转副的间隙，以提高电机的控制精度和动力性能。

参　考　文　献

[1] 孙汉涛,康秀彬.新能源驱动电机性能优化与节能研究[J].汽车维修技师, 2024(18): 120.

[2] 林东.新能源汽车永磁同步电机优化设计及偏心特性研究[D].淮南: 安徽理工大学, 2024.

[3] 张强.新能源汽车驱动电机控制策略优化研究[J].汽车测试报告, 2024(8): 53-55.

[4] FENG L, YU S, ZHANG F, et al. Study on Performance of Low-Speed High-Torque Permanent Magnet Synchronous Motor with Dynamic Eccentricity Rotor[J]. Energy Reports, 2022, 8: 1421-1428.

[5] QIAN H, GUO H, WU Z, et al. Analytical Solution for Cogging Torque in Surface-Mounted Permanent-Magnet Motors with Magnet Imperfections and Rotor Eccentricity[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2014, 50(8): 1-15.

[6] 左曙光, 张国辉, 吴旭东, 等. 倾斜偏心下轮毂永磁同步电机电磁力分析[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2015(5): 7.

[7] 陈俭. 永磁体间隙配合对高速永磁同步电机性能影响研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2023.

[8] 祝鹏泽, 高天, 郭亮. 电机径向间隙自动检测设备设计[J]. 机械工程与自动化, 2024, (4): 97-98+101.

[9] 杨流松. 含奇异位形的多刚体系统动力学优化方法研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2022.

[10] LANKARANI H M, NIKRAVESH P E. A Contact Force Model With Hysteresis Damping for Impact Analysis of Multibody Systems[J]. Journal of Mechanical Design, 1990, 112(3): 369-376.

[11] 何玲, 徐诚. 两构件冲击接触过程的理论与数值模拟[J]. 南京理工大学学报, 2012, 36(2): 171-176.

[12] 关庆华, 赵鑫, 温泽峰, 等. 基于Hertz接触理论的法向接触刚度计算方法[J]. 西南交通大学学报, 2021, 56(4): 883-890.

[13] NEWMARK N M. A Method of Computation for Structural Dynamics[J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, 1959, 85(3): 67-94.

[14] BROCK J. A Note on the Damped Vibration Absorber[J]. Transaction of the American Society of Mechanical Engineers, 1946, 13(14): A284.

（责任编辑　明慧）