

doi: 10.11918/j.issn.0367-6234.2015.09.023

降雨入渗路基湿度场演变规律

柳志军^{1,2}, 王亮亮^{1,2}

(1.深部岩土力学与地下工程国家重点实验室(中国矿业大学), 221116 江苏 徐州;

2.中国矿业大学 力学与建筑工程学院, 221116 江苏 徐州)

摘要: 为研究受地下水位高度差异的影响降雨入渗路基湿度场的分布与变化状态, 基于饱和-非饱和土渗流理论, 构建了5种具备不同初始地下水位的路基数值试验模型. 通过分析两种降雨强度情况下的试验结果, 总结了湿度场变化的主要规律, 并阐述其根本机理. 结果表明: 降雨雨强越大, 地下水受到扰动抬升越显著, 路基层位越低, 其湿度和扰动区扩距受地下水影响越显著; 随着初始水位降低, 路堤湿度极差的增幅呈二次曲线增大并至稳定值, 扰动区水平扩距呈二次曲线减小并至稳定值; 工况一定, 则对应存在一个平衡水位线, 当初始水位在其之下时, 对路基湿度演变影响甚微, 反之, 随着初始水位的增高, 路基湿度增幅呈对数递增. 处于平衡水位之上时, 初始地下水位高度对降雨入渗路基引发湿度场的分布与变化状态影响显著.

关键词: 路基; 湿度场; 初始地下水位; 降雨入渗; 演变规律; 数值试验

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2015)09-0124-05

Moisture changes of roadbed infiltrated by rainfall

LIU Zhijun^{1,2}, WANG Liangliang^{1,2}

(1.State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering(China University of Mining and Technology), 221116 Xuzhou, Jiangsu, China; 2.School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, 221116 Xuzhou, Jiangsu, China)

Abstract: To study different influences of original water tables on the roadbed moisture field infiltrated by rainfall, five scale-down laboratory roadbed physical models with different original water tables were tested base on saturated-unsaturated soil seepage theory. The roadbed moisture field change rules were examined and its mechanism was explained through analyzing infiltration test results of two different rainfall intensities. The results show that the water tables rise significantly with the increase of rainfall strength, and the influences of original levels on moisture fields get more significant along with the increase of roadbed depths. With decrease of original levels the amplifications of roadbed moisture range increase quadratically to a steady value and the extended distances of moisture disturbed zone decrease quadratically to a steady value. A balanced original water table should exist according to a given field situation. The influences of groundwater on moisture fields are very slight while the original levels are deeper than the balanced one, otherwise, with increase of original levels the amplifications of roadbed moisture increase logarithmically and the influence is very significantly when the water table is higher than the balanced one.

Keywords: roadbed; moisture field; original water table; rainfall infiltration; change rule; numerical test

对于土质路基来说, 湿度显著地影响路基土的强度指标^[1]. 在引起湿度改变的诸多方式中, 降雨从路基上部入渗最为常见和影响显著^[2], 而地下水较高容易从底部向上作用影响路基湿度^[3], 湿度场演变往往是两者耦合的结果. 我国幅员辽阔, 地势起伏较大, 造成地下水位高低差异很大. 为此, 深入

研究降雨入渗作用下, 因地下水位高度不同对路基湿度场演变产生的影响, 对解决路基工程水损害问题具有重要的基础意义.

调查^[4-7]表明, 目前的研究主要存在以下不足: 1) 基于对现场路基进行阶段性实测, 获得结论过于宏观, 未从细观上得出具体地下水位与湿度场特征值之间的关系; 2) 模型试验未考虑到实际的公路路基土压实区组合状态; 3) 仅考虑地下水位静态下毛细上渗路基, 忽视考虑降雨入渗导致地下水响应波动对路基湿度场影响作用; 4) 试验观测位置多

收稿日期: 2014-03-17.

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(51108452).

作者简介: 柳志军(1978—), 男, 博士, 讲师.

通信作者: 柳志军, liuzhijun0331@163.com.

置于边坡处某竖向断面,未涉及到行车道下的路基内部这一重要区域的湿度分布状况.因此,本文基于降雨入渗引发地下水相应波动从而扰动路基湿度场,研究初始地下水位差异影响路基湿度场演变规律,为路基设计和水病害防治工作提供理论参考.

1 饱和-非饱和渗流控制方程

降水渗入非饱和路基土体的分布演变过程属于瞬态饱和-非饱和土渗流问题,假设土骨架不变形,水为不可压缩流体,对于二维问题,其控制方程^[8]可表述为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x(\theta) \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y(\theta) \frac{\partial H}{\partial y} \right) = \rho_w g m_2^w \frac{\partial H}{\partial t} \quad (1)$$

式中: ρ_w 为水密度; $K_x(\theta), K_y(\theta)$ 分别为路基非饱和和土在 x 和 y 方向的渗透系数,随体积含水率 θ 而变化,此处工况取 $K_x(\theta) = K_y(\theta) = K(\theta)$; H 为总水头, $H = h + y_0$, h 为压力水头,为 y_0 位置水头; m_2^w 为与基质吸力 $\Psi = (u_a - u_w)$ 变化有关的水的体积变化系数,即土-水特征曲线斜率的绝对值, $m_2^w = -\theta/\Psi$, u_a 为空隙气压力, u_w 为孔隙水压力, θ 为非饱和土的体积含水量.

降雨过程中前期雨水由边坡全部入渗,为流量边界控制,其值等于降雨强度的负值,即

$$K \frac{\partial H}{\partial m} \Big|_{\Gamma} = -I \quad (2)$$

式中: I 为降雨强度, m 以边界的外法向为正向.

随着时间推移,继续降雨使得坡面饱和,产生径流,其控制方程^[9]为

$$\begin{cases} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial v h}{\partial x} = I \cos \alpha - f, \\ q = \frac{1}{n} h^{\frac{5}{3}} \sin \alpha^{\frac{1}{2}}. \end{cases} \quad (3)$$

式中: v 为坡面 x 位置处流速; α 为坡角; f 为边坡 x 位置处入渗率; q 为坡面径流的单宽流量, $q = v h$; n 为坡面粗糙系数.

对上述控制方程进行有限元离散,对时间使用中心差分法进行求解.

2 试验方案设计

本文采用专业土体有限元渗流数值分析软件SEEP/W进行建模试验分析,该软件分析基于上述渗流控制方程,用以研究降雨入渗路基与边坡问题^[10-11].鉴于公路横断面呈中心轴对称,因此取半幅进行建模.路基模型顶宽为13 m,行车道为 2×3.75 m,硬路肩为3 m,土路肩为0.75 m,半幅中间

带为1.75 m,路拱横坡为2%,路基高度为3 m,地基厚度为15 m,路基按照一级公路标准划分压实区,路床区为96%,上路堤为94%,下路堤与地基土压实度为93%,边坡坡率1:1.5,数值模型网格划分7 434个单元,7 592个节点.

边界条件及初始条件:在中间带表面、路面、坡面和地面皆降雨,降雨强度为96 mm/d和192 mm/d,降雨历时4 d,路面、路肩以及中间带不透水(表层设置为空材料),雨水径流叠加至坡面;入渗面为边坡以及边坡外地面,其中坡脚处设置了排水边沟,因此该处不施加雨强边界.路基初始含水量为7%,初始地下水位分为5种,分别距离路基底面1、3、5、7、9 m.数值试验模型见图1(仅示水位5 m).

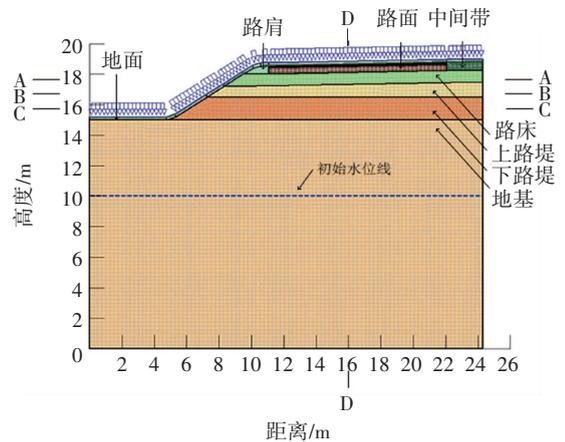


图1 路基湿度场数值模型

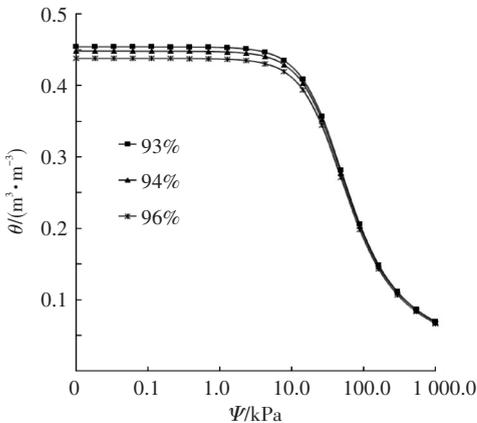
试验中,路基湿度的测读位置分别距离路槽底下为30 cm(A—A)、120 cm(B—B)、250 cm(C—C)水平层位(分别代表路床区、上路堤区、下路堤区),以及外侧行车道中部以下竖向纵深断面(D—D).

3 路基土性测定

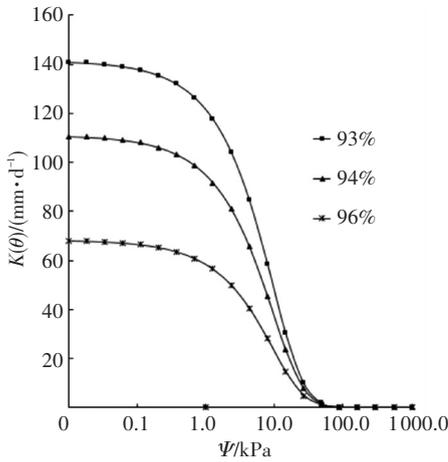
试验测定土样的液限为35.9%,塑限为21.0%,塑性指数IP为14.9,最佳含水量为11.6%,最大干密度为1.87 g/cm³.筛分颗粒结果:粒径2~5 mm的颗粒质量占0.2%,1~2 mm的占0.4%,0.5~1.0 mm的占18%,0.25~0.50 mm的占8.2%,0.075~0.250 mm的占30.3%,小于0.075 mm的占42.9%.关于试验路基土的水分特征曲线,SEEP/W提供的VG模型^[12]与实测数据线型十分相近,因此本文用其非饱和渗流计算参数进行估计,不同压实度情况下的土水特征曲线及渗透函数曲线见图2.

在此说明,因SEEP/W中湿度值是使用体积含水率来表示的,将质量含水率与体积含水率进行互换,即 $w_v = G_s \cdot w_o / (\rho_w + G_s \cdot w_o)$,式中 w_v 为体积含水率, m³/m³; G_s 为土颗粒重度, g/cm³, 本文

取 2.71; w_0 为质量含水率,%; ρ_w 为水的重度, g/cm^3 , 本文取 1.0.



(a) $\theta - \Psi$



(b) $K(\theta) - \Psi$

图 2 水分运动参数曲线

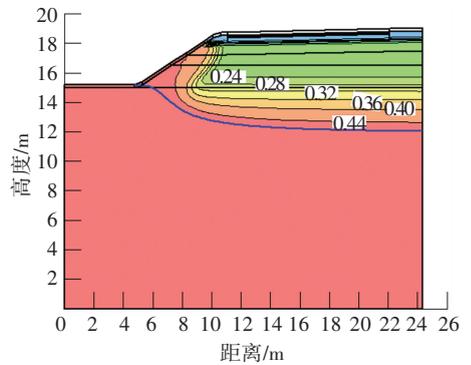
4 试验结果与分析

历时 4 d 降雨后,不同初始水位的路基湿度场云图见图 3. 图 3 表明,历时 4 d 降雨入渗地下水受到扰动而呈现不同程度的抬升,且初始水位越高,抬升越明显. 反之,图 3(b)、3(d)表明地下水位很低时受到扰动影响小. 图 3(b)、3(c)对比表明,初始地下水位相同,降雨强度越大地下水受到扰动抬升越明显. 以雨强 192 mm/d 为例,各测位的路基湿度随初始水位变化分布见图 4.

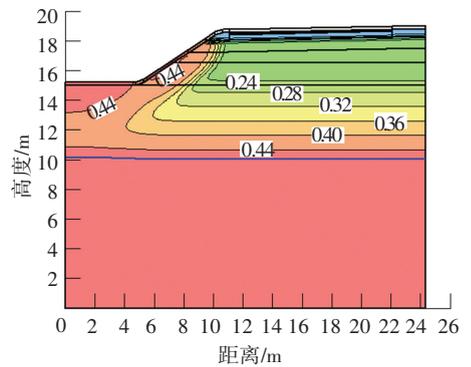
图 4(a)~4(c)表明,路基层位越高,地下水影响越微弱. 如以初始水位 1 m 的扰动区路基湿度为参照,其他情况的湿度与其对应位置差异的最大值(简称极差)表现为:A—A 层位<B—B 层位<C—C 层位. 绘制 C—C 层位极差随初始水位变化见图 5.

图 5 表明,随初始水位降低,湿度极差增幅迅速增大并至稳定. 进入稳定之前的曲线基本上符合 $R_c = a \cdot h_w^2 + b \cdot h_w + c$ 二次增长规律. 其中 R_c 为湿度极差,%; h_w 为初始水位高度,m; a 、 b 、 c 是受降雨

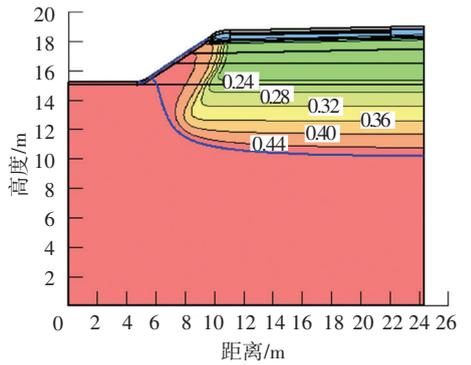
历时、雨强、路基土压实度 3 个主要因素影响的参数. 图 4(a)~4(b)表明,A—A 和 B—B 层位扰动区扩距非常相近,而 C—C 层位表现出较大差异,绘制其扩距随着初始水位变化见图 6.



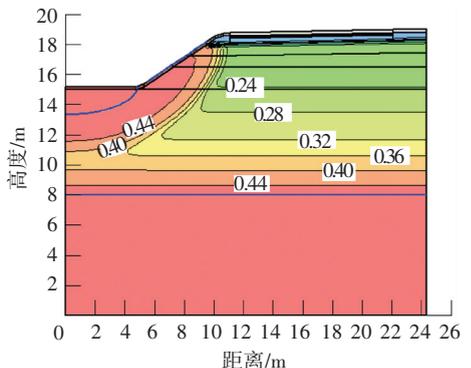
(a) 地下水位 3 m,降雨强度 96 mm/d



(b) 地下水位 5 m,降雨强度 96 mm/d

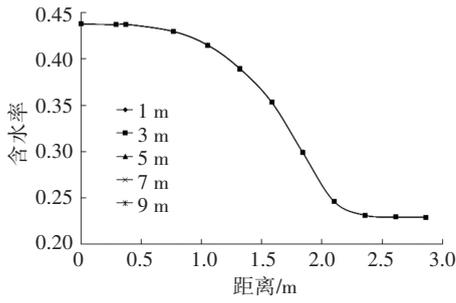


(c) 地下水位 5 m,降雨强度 192 mm/d

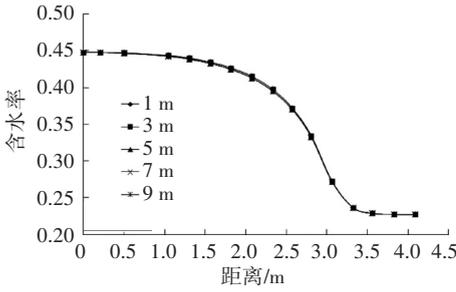


(d) 地下水位 7 m,降雨强度 192 mm/d

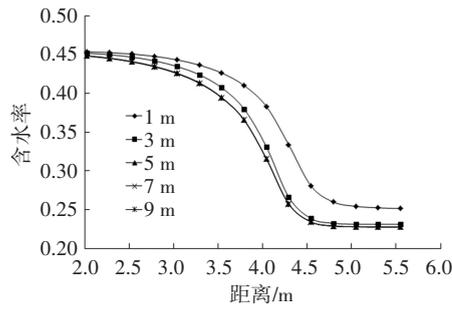
图 3 初始水位影响路基湿度场云图



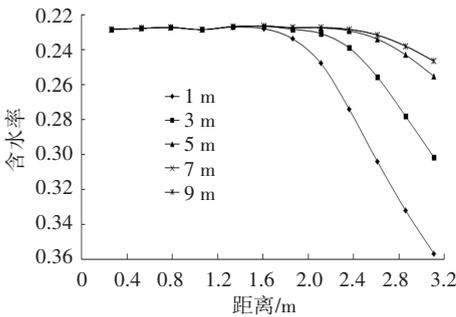
(a) A—A 层位



(b) B—B 层位



(c) C—C 层位



(d) D—D 层位

图4 路基不同测位湿度分布

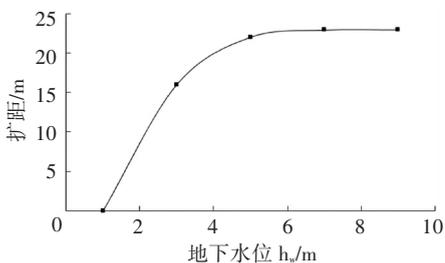


图5 湿度极差随初始水位变化

图6表明,扰动区扩距随着初始地下水位降低而减小直至稳定状态,但路床区和上路堤受到影响

甚微,而下路堤受到影响比较显著,到达稳定值之前,其扩距随着地下水位线基本符合二次曲线 $D = a \cdot h_w^2 + b \cdot h_w + c$ 变化规律,其中 D 为扰动区扩距, m , a , b , c 是受降雨历时、雨强、路基土压实度 3 个主要因素影响的参数. 图 4(d) 表明,上部路床湿度受地下水位影响微弱,而从上路堤层位往下,地下水位高度对于湿度场的影响越发显著. 绘制 D—D 断面下路堤的湿度增幅(相对于初始湿度)随地下水位变化见图 7.

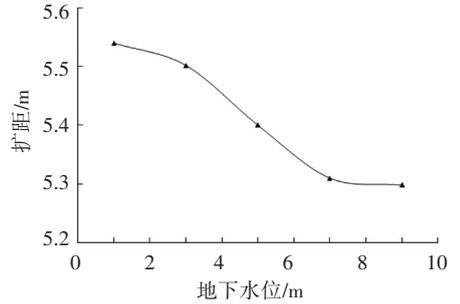


图6 扰动区扩距随初始水位的变化

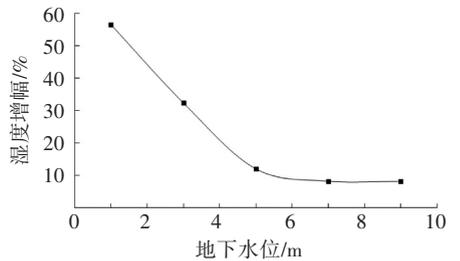


图7 下路堤湿度增幅随着初始水位的变化

图7表明,下路堤湿度增幅随着初始水位的降低迅速减小. 并且,初始水位小于 5 m 时,路堤受到水位线(孔压为 0)抬升的直接上浸作用,湿度值显著增大;而初始水位大于 5 m 之后,地下水直接上浸的影响消失. 因此,存在一个平衡水位线(其值由雨强、历时、压实度、初始湿度因素共同决定),当初始水位高于平衡水位线时,路基湿度增幅随着初始水位的提高基本符合对数 $A = a \cdot \ln h_w + b$ 增大,其中 A 为湿度增幅, a , b 同样是受降雨历时、雨强、路基初始湿度、路基压实度 3 个主要因素的影响的参数. 若公路状态和降雨条件一定,则初始地下水位高于平衡水位时,地下水对路基湿度影响比较剧烈,反之影响甚微.

5 结论

1)降雨强度愈大,地下水越容易受到扰动抬升越明显,而路基层位越低,路基湿度变化和扰动区扩距受地下水影响越显著.

2) 路堤湿度极差随初始水位降低增幅迅速增大并至稳定, 稳定之前基本符合二次曲线 $R_c = a \cdot h_w^2 + b \cdot h_w + c$ 增长规律。

3) 水平扩距随着初始水位降低而减小至稳定, 稳定之前基本呈二次曲线 $D = a \cdot h_w^2 + b \cdot h_w + c$ 变化。

4) 对于一个给定的工况来说, 对应存在一个平衡地下水水位线, 当初始水位高于平衡地下水水位线时, 地下水对路基湿度影响比较剧烈, 路基湿度增幅(相对于初始湿度)随着初始水位的提高基本呈对数 $A = a \cdot \ln h_w + b$ 增大; 低于平衡地下水水位线时, 影响甚微。

参考文献

[1] KHOURY N, BROOKS R, KHOURY C, et al. Modeling resilient modulus hysteretic behavior with moisture variation [J]. International Journal Geomechanics, 2012, 12(5): 519-527.

[2] NGUYEN Q, FREDLUND D G, SAMARASEKERA L, et al. Seasonal pattern of matric suctions in highway subgrades [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2010, 47(3): 267-280.

[3] 凌建明, 谢经保, 郑悦锋, 等. 基于地下水变位的路基顶面当量回弹模量预估 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2005, 33(2): 162-165.

[4] 钱劲松, 王朋, 凌建明, 等. 潮湿多雨地区高速公路路基

湿度的实测特征 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2013, 41(12): 1812-1817.

[5] AL-SAMAHIJI D, HOUSTON S, HOUSTON W. Degree and extent of wetting due to capillary rise in soils [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2007, 1709: 114-120.

[6] LI G F, HUANG Y, CHEN C H. Study on capillarity water rise in subgrade soil [J]. Advanced Materials Research, 2011, 250: 1702-1706.

[7] 刘杰, 姚海林, 胡梦玲, 等. 水位波动下路基湿度动态响应及地下防排水模型试验研究 [J]. 岩土力学, 2012, 33(10): 2917-2922.

[8] RICHARD L A. Capillary conduction of liquids through porous mediums [J]. Physics, 1931, 1(5): 318-333.

[9] 童富果, 田斌, 刘德富. 改进的斜坡降雨入渗与坡面径流耦合算法研究 [J]. 岩土力学, 2008, 29(4): 1035-1040.

[10] TSAI T, CHEN H. Effects of degree of saturation on shallow landslides triggered by rainfall [J]. Environmental Earth Science, 2010, 59(6): 1285-1295.

[11] WON T, VANAPALLI S. Influence of rain infiltration on the stability of compacted soil slopes [J]. Computers and Geotechnics, 2010, 37(5): 649-657.

[12] 林鸿州, 于玉贞, 李广信, 等. 土水特征曲线在滑坡预测中的应用性探讨 [J]. 岩土力学与工程学报, 2009, 28(12): 2569-2576.

(编辑 魏希柱)

封面图片说明

封面图片来自本期论文“超声加工的非接触能量传输仿真与实验”。图片是基于 Maxwell 电磁场有限元平台, 获得的发射与接收电磁模块的磁场分布与能量传递分布云图。文章通过构建的仿真模型, 研究并获得了旋转转速、级间磁隙、谐振补偿参数等因素对互感耦合的影响规律。研究结果表明: 保持同一交流信号激励和相同的级间磁隙的条件下, 激磁绕组某一刻的电流密度基本各处相等, 感应绕组的电流密度也近似相等。当非接触式传递系统的转速由 0 增加至 6 000 r/min, 初、次级线圈绕组电流密度和磁芯磁通密度随旋转转速的增加并无显著变化, 传递效率可以达到 90% 以上, 证明了本系统可应用于高转速的能量传输系统。由磁芯磁通密度 B 的矢量分布云图可得, 系统在进入稳态后, 初级磁芯到次级磁芯的磁通密度逐级递减, 甚至出现数量级的衰减, 磁芯磁密由内侧到外侧亦是逐级递减, 说明初级磁芯和磁芯外侧的磁密较大。从磁密 B 分布的标量云图可得, 次级磁芯和靠近内侧的磁密较小, 分布也是不均匀的, 这是由于磁隙的磁损耗和磁芯内外侧体积不一致引起。因此在实际应用中, 必须保持磁隙适当间距且要平衡磁芯内外侧的磁密分布, 提高磁芯的利用率以满足系统传递效率的要求。

(图文提供: 隆志力, 等, 哈尔滨工业大学深圳研究生院)